



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

해군함정으로의 고고도  
전자기파(HEMP) 커플링 현상에  
대한 전자기적 모델링 및 대책

Electromagnetic Modeling and Protective  
Measures of High Altitude Electromagnetic  
Pulse Coupling into Naval warship

2014 년 2 월

서울대학교 대학원

전기 · 정보 공학부

양 진 호

# 초 록

## 해군함정으로의 고고도 전자기파(HEMP) 커플링 현상에 대한 전자기적 모델링 및 대책

서울대학교 대학원

전기·정보 공학부

양 진 호

고고도 핵폭발에 의해 고출력 전자기 펄스(HEMP)가 생성된다. 본 논문에서는 Bell 연구소와 IEC 61000-2-9 에서 각각 정의한 HEMP 가 해군 함정으로 침투할 때 침투 전계 특성을 비교 및 분석하고 해군에 정립되지 않은 HEMP 기준을 제시하였다. 또한 HEMP 결합(Coupling)을 크게 복사성 결합(Back-door Coupling)과 전도성 결합(Front-door Coupling)으로 구분하여 해군 함정에서

복사성 결합 경로인 유리창, 통풍관과 전도성 결합 경로인 Antenna, Cable 을 통해 HEMP 가 입사할 때 특성 분석 및 취약개소에 대한 방호대책을 제시하였다. 제안한 차폐 재질과 적용 방법은 미국 국방부의 HEMP 관련 군사규격인 MIL-STD-188-125-1 에서 제시된 기준에 근거하였고 차폐 시뮬레이션 결과와 비교 및 분석하였으며, 해군 함정에서 HEMP 에 대한 방호가 가능함을 확인하였다. 추가적으로 부록에서는 최근에 부각되고 있는 비핵 전자기펄스의 개념 및 특성 분석, 해군 함정으로의 영향 및 대책을 확인하였다.

주요어 : 전자기펄스, 고고도 전자기펄스, 해군 함정, 결합 경로, 차폐효율, 펄스 전류 시험, 비핵 전자기펄스

학 번 : 2012 - 22569

## 목 차

제 1장 서 론 .....	1
제 2장 전자기펄스(EMP) 기본개념 및 이론 .....	3
2.1 역사적 관점.....	3
2.2 전자기펄스(EMP) 기본개념 .....	5
2.2.1 Compton 효과.....	5
2.2.2 HEMP의 특성 및 형태 .....	6
제 3 장 전자파 차폐 기준 .....	8
3.1 차폐효율(Shielding Effectiveness) .....	8
3.2 펄스 전류 주입(Pulse Current Injection) 시험 .....	10
제 4 장 시뮬레이션 결과 및 분석.....	12
4.1 Warship Modelling & EMP 결합 경로 .....	12
4.2 Excitation Signal.....	14
4.3 시뮬레이션 결과.....	17
4.3.1 복사성 결합(Back-door Coupling) 결과 .....	17
4.3.1.1 EMP 함정내부 침투 기여도 분석.....	22
4.3.1.2 EMP 입사방향에 따른 결과 분석.....	23

4.3.1.3 EMP Polarization 방향에 따른 결과 분석 .....	26
4.3.2 전도성 결합(Front-door Coupling) 결과 .....	29
4.3.2.1 CST Cable Studio 정확도 분석 .....	29
4.3.2.2 합정의 안테나 Cable 결합 결과 .....	33
제 5 장 대책 및 적용 .....	29
5.1 EMP 방호대책 .....	36
5.2 시뮬레이션 적용 결과 .....	38
5.2.1 복사성 결합(Back-door Coupling) 결과 .....	40
5.2.2 전도성 결합(Front-door Coupling) 결과 .....	43
제 6 장 결 론 .....	45
부 록 A 비핵 전자기펄스에 의한 영향 및 대책 .....	46
A.1 비핵 전자기펄스의 기본개념 .....	46
A.2 UWB의 형태 및 특성 .....	47
A.3 시뮬레이션 결과 및 분석 .....	49
참고문헌 .....	52
ABSTRACT .....	54

## 표 목차

표 1.1 전자파 차폐 대상부대 및 구비 부대 현황 .....	2
표 2.1 초기 HEMP 파형의 파라미터.....	7
표 3.1 전도성 HEMP 파형 정의 .....	12
표 5.1 EMP 함정 방호대책.....	38
표 A.1 UWB 파형의 파라미터 .....	47

## 그림 목차

그림 1.1 북의 EMP 공격 개념도.....	1
그림 2.1 미국 Starfish Prime 실험.....	3
그림 2.2 구소련 The K Project 실험 .....	4
그림 2.3 Compton 효과 개념도 .....	5
그림 2.4 HEMP 파형 특성의 두 기준.....	7
그림 3.1 미국 국방부 기준 차폐 요구 성능 .....	9
그림 3.2 해군 수상함정 차폐 요구 성능 .....	10
그림 3.3 이중 지수 함수 파형 .....	11
그림 4.1 해군 함정 모델링 및 EMP 결합 경로.....	13
그림 4.2 해군 함정 Problem Space(조타실, 통신실) .....	14
그림 4.3 조타실 침투전계의 주파수 특성(Bell Labs&IEC) ....	15
그림 4.4 통신실 침투전계의 주파수 특성(Bell Labs&IEC) ....	15
그림 4.5 Transient EMP waveform(IEC) .....	16
그림 4.6 자유공간에서의 시간 domain상 E-field(조타실).....	17
그림 4.7 자유공간에서의 주파수 domain상 E-field(조타실) ..	18
그림 4.8 Problem space에서의 시간 domain상 E-field(조타실) ..	18



그림 4.9 Problem space에서의 주파수 domain상 E-field(조 타실).....	18
그림 4.10 조타실의 차폐효율(Shielding Effectiveness) .....	19
그림 4.11 자유공간에서의 시간 domain상 E-field(통신실) ..	20
그림 4.12 자유공간에서의 주파수 domain상 E-field(통신실)	20
그림 4.13 Problem space에서의 시간 domain상 E-field(통 신실).....	20
그림 4.14 Problem space에서의 주파수 domain상 E- field(통신실) .....	21
그림 4.15 통신실의 차폐효율(Shielding Effectiveness) .....	21
그림 4.16 조타실 · 통신실 EMP 침투 기여도.....	132
그림 4.17 EMP 입사방향(Horizontal, Oblique, Vertical) .....	24
그림 4.18 EMP 입사방향에 따른 조타실내 E-field 크기 .....	24
그림 4.19 EMP 입사방향에 따른 통신실내 E-field 크기 .....	25
그림 4.20 Polarization 방향에 따른 E-field 크기(정면 입사)	26
그림 4.21 Polarization 방향에 따른 E-field 크기(비스듬히 입사).....	27
그림 4.22 Polarization 방향에 따른 E-field 크기(수직 입사)	28

그림 4.23 Coaxial cable(RG-58/1.5m)의 감쇄상수 .....	29
그림 4.24 CST MW를 이용한 Coaxial cable의 S21 시뮬레이션.....	30
그림 4.25 CST CS를 이용한 Coaxial cable 모델링 .....	31
그림 4.26 CST DS를 이용한 Coaxial cable 회로도.....	31
그림 4.27 합정의 안테나 케이블 및 모델링 .....	33
그림 4.28 합정 안테나 케이블 회로도 및 인가파형 .....	33
그림 4.29 합정 안테나 유입 전류 Input 및 Output .....	34
그림 5.1(a) 방호 안 된 공간, (b) 방호된 공간.....	36
그림 5.2 복사성 EMP 방호대책(차폐 코팅, 허니컴 통풍관)을 적용한 합정 .....	38
그림 5.3 전도성 EMP 방호대책인 TVS 소자 .....	39
그림 5.4 방호대책을 적용한 Time-domain상 E-field(조타실) ....	40
그림 5.5 방호대책을 적용한 Frequency-domain상 E-field(조타실) .....	40
그림 5.6 방호대책 적용된 조타실의 차폐효율 .....	41
그림 5.7 방호대책을 적용한 Time-domain상 E-field(통신실) ....	41
그림 5.8 방호대책을 적용한 Frequency-domain상 E-	

field(통신실) .....	42
그림 5.9 방호대책 적용된 통신실의 차폐효율 .....	42
그림 5.10 TVS 소자를 적용한 Schematic .....	43
그림 5.11 TVS 소자를 적용한 회로의 잔류전류 결과 .....	44
그림 A.1 다양한 전자기펄스의 주파수 분포 .....	46
그림 A.2 HEMP와 UWB의 시간 특성 .....	48
그림 A.3 HEMP와 UWB의 주파수 특성 .....	49
그림 A.4 UWB · HEMP의 함정 침투 전계 비교(조타실) .....	49
그림 A.5 UWB · HEMP의 함정 침투 전계 비교(통신실) .....	50
그림 A.6 UWB에 의한 조타실 · 통신실의 차폐효율 (Unshielded) .....	51
그림 A.7 UWB에 의한 조타실 · 통신실의 차폐효율(Shielded)	51

## 제 1 장 서 론

최근 북한의 핵 개발 및 도발 위협에 따라 EMP(Electromagnetic Pulse)의 관심 증대 및 방호대책의 중요성이 부각되고 있다. 특히 북한은 2012년 4월 23일 조선중앙 TV를 통해 “지금껏 있어본 적 없는 특이한 수단으로 3~4분만에 남한을 초토화하겠다.”, 2013년 3월 6일 노동신문을 통하여 “핵(核) 타격으로 서울과 워싱턴을 불바다로 만들겠다. 아직 세상이 알지 못하는 우리 식의 정밀 핵 타격 수단으로 맞설 것이다.”라는 공식발표를 통해 대한민국의 안보를 위협하고 있는데, 전문가들은 “세상이 알지 못하는 정밀 핵 타격 수단”이 결국 소형 핵폭탄을 이용한 “EMP 폭탄”일 것이라는 분석을 내놓고 있다[1].



지난 2012년 국감브리핑에서는 민주당 의원이 국방부로부터 제출받은 ‘전자파 차폐 대상부대 및 전자파 방호능력 구비 현황’ 자료에 따르면 우리 군은 EMP 방호능력이 필요한 시설 221개소 중 2012년 8월 말 기준 단 3개소에 대해서만 EMP 방호능력을 확보하고 있다고 밝혔다. 이는 북한의 연이은 핵실험 이후 북한의 EMP 공격에 대한 우리 군의 방호 능력 확보의 시급성이 지속적으로 요구됐지만, 아직까지도 우리 군의 EMP 방호능력 확보 수준은 미비한 실정인 셈이다[2].

구 분	대상부대	구 비	진행/예정	미구비
계	221	3	32	186
육 군	143	1	2	140
해 군	31	-	1	30
공 군	39	-	26	13
국 직	8	2	3	3

표 1.1 전자파 차폐 대상부대 및 구비 부대 현황

특히, 표 1.1에서 볼 수 있듯이 해군 대상부대 중 전자파 차폐 구비가 된 부대는 없으며, 함정 또한 신형함정을 제외하고 현재 작전중인 해군 함정의 경우 대책이 미흡하다. 따라서 본 논문에서는 해군 함정으로의 EMP에 의한 영향을 분석하고 그에 따른 대책을 제시하고자 한다.

## 제 2장 전자기펄스(EMP) 기본개념 및 이론

### 2.1 역사적 관점

미국은 1962년 7월 9일 태평양의 Johnson 섬 상공 400km에서 1.44메가톤급 핵 폭발을 폭발시킨 Starfish Prime 실험을 실시했다. 그런데 그림 2.1처럼 폭발지점과는 무관한 약 1,400km 떨어진 Hawaii Ohau섬의 각종 회로차단기와 도난 및 공습 경보기가 오작동하고 가로등이 꺼지는 당시로서는 기이한 현상이 발생했다. 미국은 이후 EMP를 무기로 사용하는 연구를 시작했는데 이것이 EMP의 발견이며 연구의 시초가 되었다.

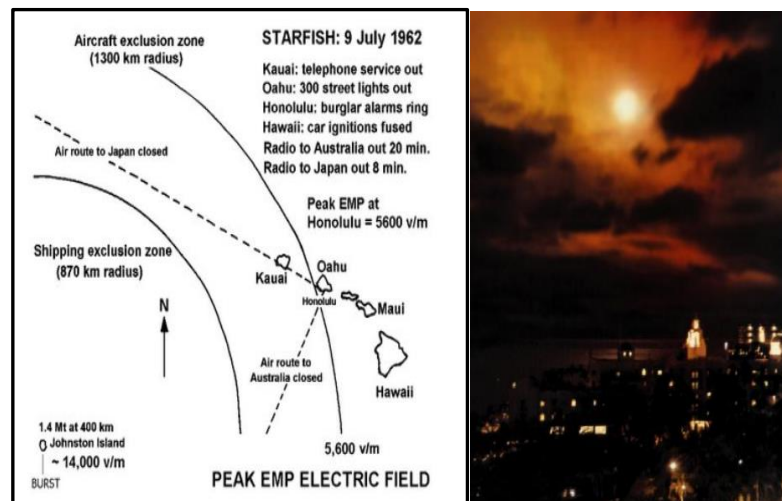


그림 2.2 미국 Starfish Prime 실험

또한 같은 해(1962년) 10월 카자흐스탄 상공 우주공간에서 300kt급 핵 폭탄을 폭발시킨 구소련의 The K Project 실험이 있었는데, 약 600km내의 지상 및 지하 매설 전력선과 통신선로가 손상되었고 각종 전력선의 절연체가 훼손되고 디젤발전기 및 각종 안테나시스템이 고장 났으며 Karagandy시에 위치한 변전소에 화재가 발생하였다. 이로 인해 구소련도 EMP에 관심을 가지고 연구에 본격적으로 착수하게 된 계기가 되었다.



그림 2.2 구소련 The K Project 실험

## 2.2 전자기펄스(EMP) 기본개념

### 2.2.1 Compton 효과

전자에 X선을 쏘았을 때 전자가 튀어나오는 현상으로, 1923년 미국의 실험 물리학자인 콤프턴이 발견하였으며, 이 산란을 콤프턴 산란이라고 한다. 이때 산란된 X선의 파장이 입사된 X선의 파장보다 길어지는데 이 현상은 X선의 파동설로는 설명할 수가 없다. 파동설에 따르면 입사된 X선의 파장과 산란된 X선의 파장은 같아야만 한다. 콤프턴은 이 현상을 X선 광량자와 전자의 충돌이라는 입자설의 관점에서 설명하였는데, 이를 콤프턴 효과라 한다.

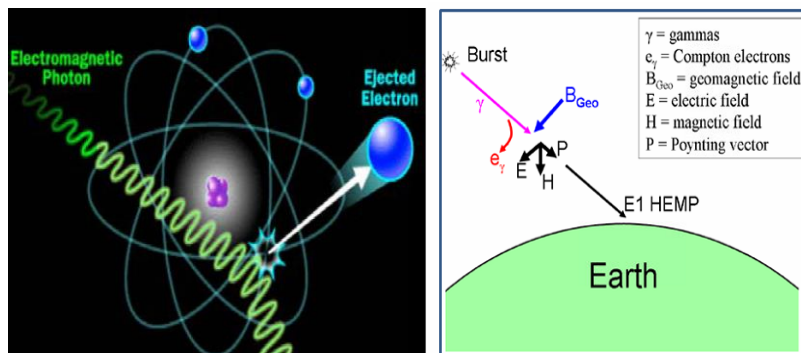


그림 2.3 Compton 효과 개념도

핵 폭발에 의해 발생한 감마선이나 X 선이 공기 중의 원자나 분자와 충돌하여 콤프턴 효과에 의해 자유전자와 양이온을 발생시키고 이로



인한 Compton 전자는 다시 지구 자기장과 결합하여 순간적으로 광범위한 영역에 전자기 펄스를 발생시킨다. 이와 같이 발생한 전자기 펄스를 핵 전자기펄스(NEMP : Nuclear Electromagnetic Pulse)라고 부른다.

### 2.2.2 HEMP의 특성 및 형태

HEMP(High Altitude Electromagnetic Pulse)는 고고도 핵전자기펄스로 EMP가 핵폭발에 의해 발생한 경우를 의미한다. HEMP의 전계는 다른 지속시간을 가지는 초기 HEMP, 중기 HEMP, 말기 HEMP 등 3개의 성분으로 복합적인 구조를 가진다. 광범위한 전자장비에 가장 위험한 초기 HEMP를 기준으로 Bell 연구소와 IEC 61000-2-9 기준에 서는 아래와 같은 식으로 정의하고 있다.

$$E(t) = KE_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad \text{식 (2.1)}$$

구 분	$E_0$ (KV/m)	K	$\alpha(s^{-1})$	$\beta(s^{-1})$
Bell Labs	50	1.05	$4 \times 10^6$	$4.76 \times 10^8$
IEC 61000-2-9	50	1.30	$4 \times 10^7$	$6 \times 10^8$

표 2.1 초기 HEMP 파형의 파라미터

식(2.1)에서  $t$ 는 시간, 각각의 감쇠 정수 및 진폭에 관한 파라미터들은 표 2.1에 나타내었다. 그림 2.4는 Bell 연구소와 IEC 61000-2-9 기준에서 제시하고 있는 HEMP 파형의 시간영역 특성을 나타내고 있다. 두 기준 모두 최대 크기는 50kV/m이며, 10~90% 상승시간  $T_r$ 은 각각 4.1ns, 2.5ns, 최대값 도달 시간  $T_p$ 는 각각 10.1ns, 4.8ns이다[7].

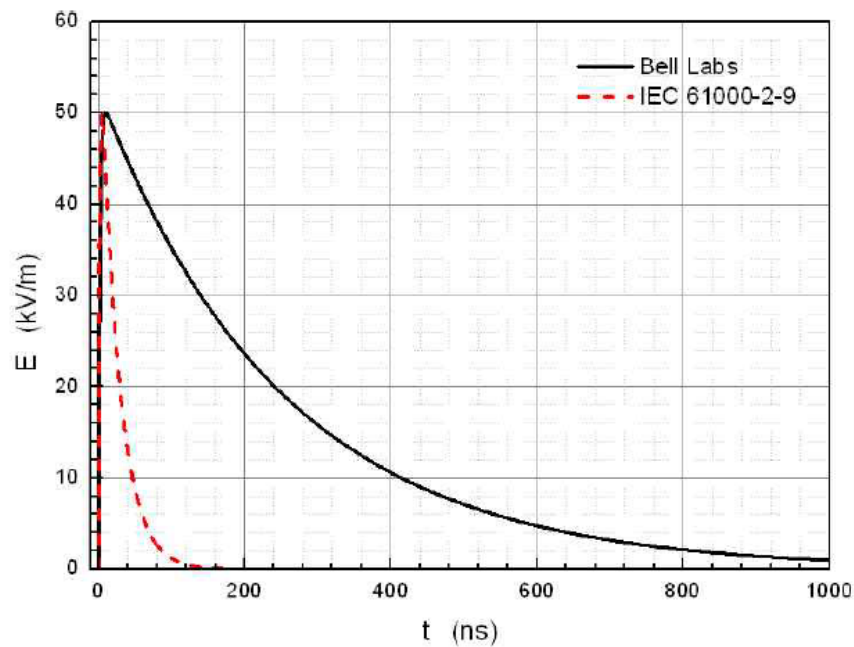


그림 2.4 HEMP의 파형 특성의 두 기준

## 제 3 장 전자파 차폐 기준

전자기펄스는 대상 장비나 회로에 결합되는 결합효과(Coupling)를 일으키는데 두 가지 경로가 있다. 첫 번째는 복사성 결합(Back-door Coupling)이고 두 번째는 전도성 결합(Front-door Coupling)이다[3],[4]. 따라서 전자파 차폐 또한 두 가지 방법을 통해 이루어져야 하며, 차폐 이론 및 기준 또한 두 가지가 있다.

### 3.1 차폐효율(Shielding Effectiveness)

복사성 결합에 의한 피해 기준인 차폐효율(Shielding Effectiveness)은 미국 국방부에서 제시한 기준으로 아래 식(3.1)과 같이 정의되며, 차폐 요구 성능표는 그림 3.1 과 같다[5].

$$SE = 20 \log_{10} \frac{\text{Empty space frequency response}}{\text{Problem space frequency response}} \quad \text{식 (3.1)}$$

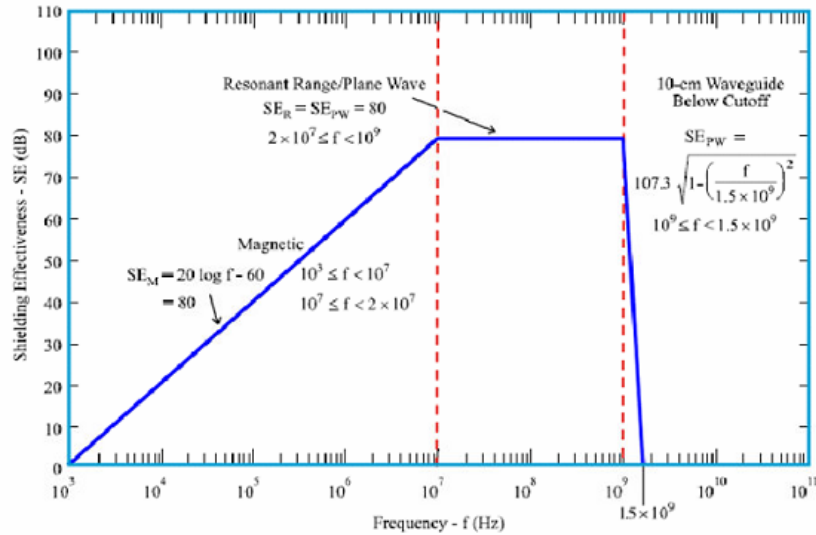


그림 3.1 미국 국방부 기준 차폐 요구 성능

미국 국방부 기준의 차폐 요구 성능을 보면 주파수 범위별로 조금씩 차이가 있지만 결론적으로 모든 주파수 범위에서 80dB 이상을 만족해야 전자장비의 오작동 및 파괴현상을 방지할 수 있다. 이것은 일반적인 사항이며, 국방시설과 민수시설의 기준이 조금 다르고 육·해·공군의 기준도 차이가 있다. 왜냐하면 국방시설이 민수보다 좀 더 방호에 유리하고 견고하게 제작되고 육·해·공군의 활동영역(지상·바다·하늘)의 차이로 전자파의 반사 형태가 조금씩 다르기 때문이다. 따라서 본 논문의 주제와 연관된 해군 수상함정의 기준(MIL-STD-461E, RS103)을 살펴보면 그림 3.2 와 같이 모든

주파수 영역에서 인가 전계 50kV/m 대비 침투 전계 10V/m, 즉 73dB 이상이 요구된다.

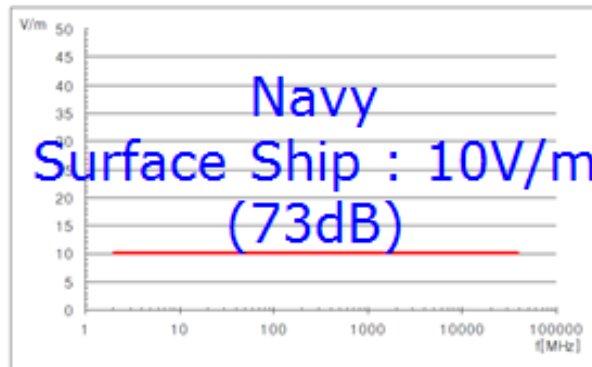


그림 3.2 해군 수상함정 차폐 요구 성능

### 3.2 펄스 전류 주입(Pulse Current Injection) 시험

전도성 피해신호에 의한 피해에 대한 기준인 PCI 테스트는 펄스 전류를 외부 케이블에 인가, 차폐벽 내부로 유입되는 양이 허용한계치 이내인지 검증하는 테스트이다. HEMP 의 세 가지 형태 중 초기 HEMP 가 그림 3.3 과 같이 이중 지수 함수의 임펄스 파형을 가지고 HEMP 보호 시설의 성능을 평가하는데 일반적으로 적용하고 있는 MIL-STD-188-125-1 에서 규정된 전도성 HEMP 신호의 파형은 표 3.1 과 같다[6].

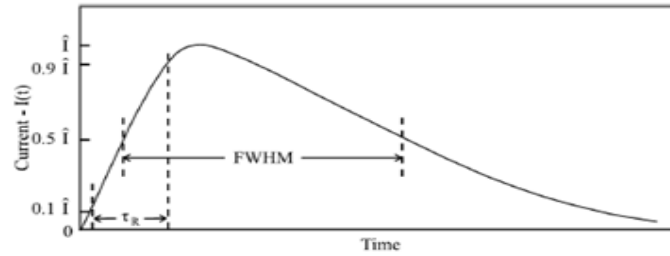


그림 3.3 이중 지수 함수 파형

구 분	$E_1$	$E_2$	$E_3$
상승시간	$\leq 20\text{ns}$	$\leq 1\ \mu\text{s}$	$\leq 0.2\text{s}$
펄스 폭	500~550ns	3~5ms	20~25s
진폭	2,500A	250A	1,000A

표 3.1 전도성 HEMP 파형 정의

위의 이중 지수 함수 형태의 전도성 HEMP 파형에서 2,500A 는 HEMP 가 케이블에 결합(Coupling)할 수 있는 최대값이다. 미국방부 기준 MIL-STD-188-125-1 에서는 각각의 경우에 따라 허용한계치가 다르게 나타나 있는데, 본 연구의 주제범위인 송수신 안테나의 경우 방호대책을 적용하였을 경우 내부에서 잔류 전류 1A 이하를 만족하여야 한다[5].

## 제 4 장 시뮬레이션 결과 및 분석

EMP 결합(coupling) 경로는 두 가지로 나뉜다. 하나는 안테나와 Transmission Line을 통한 Front-end 전자장비의 파괴 또는 장애와 관련된 Front-door coupling, 또 다른 하나는 Aperture와 Slot을 통한 전자장비의 파괴 또는 장애와 관련된 Back-door coupling이다. 이 두 가지 경로를 들어오는 EMP pulse를 차폐효율 계산식과 PCI 테스트를 통해 각각 복사성 결합과 전도성 결합의 결과를 도출하고 이것을 미국 국방부 기준과 비교 및 분석하였다.

### 4.1 Warship Modeling & EMP 결합 경로

그림 4.1은 현재 해군에서 작전중인 해군 함정을 모델링한 것이다. 함정의 세부적인 제원은 보안상 표기하지 않았지만, 해군의 협조를 받아 정확한 제원을 바탕으로 모델링을 진행했다. 특히 EMP 결합에 직접적인 영향을 줄 수 있는 유리창(전부 7, 측면5), 통풍관(전부 2, 후부 2)은 제원에 기초하여 직접 모델링하였고, 안테나의 경우는 케이블의 종류 및 길이를 확인하여 CST CS를 이용 등가 모델링하였다.

함정을 이루고 있는 전체의 Material은 철(물성정보 Iron Type : Lossy metal,  $\mu_r$  : 1, Electric Conductivity :  $1.04 \times 10^7$ )이며 두께는 00cm이다.

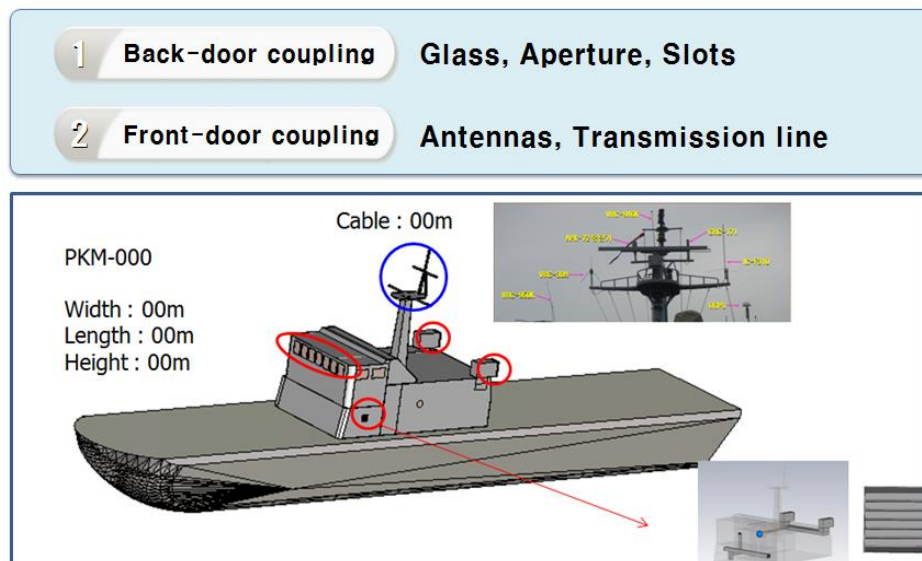


그림 4.1 해군 함정 모델링 및 EMP 결합 경로

실제 크기의 함정을 그대로 모델링하여 시뮬레이션을 진행하기에는 EM Simulator의 특성상(mesh 수의 제한, 시뮬레이션 시간 과다 등) 제한이 있고 또한 실제 EMP에 의해서 전압, 전류가 유기되는 곳은 전자장비이므로 통신·전자장비가 집중되어 있는 곳을 중점으로 살펴 보았다. 그림 4.2 왼쪽에서 보듯이 전체 구조 가운데 점선으로 표시된 부분이 조타실(레이더, 통신기, 조타기, 기관전령기 등), 통신실



(통신 전자장비 Receiver)이 위치해 있으므로 이곳의 격실을 중심으로 Problem space를 정하고 그 외의 부분은 Boundary Condition을 적용하였다. 그림 4.2 오른쪽에서 보듯이 경계조건을 점선 아래 부분은 철판으로 이루어진 수면하 구조물로써 PEC로 가정하였고, 함정 이외의 부분은 자유공간으로 처리하였다.

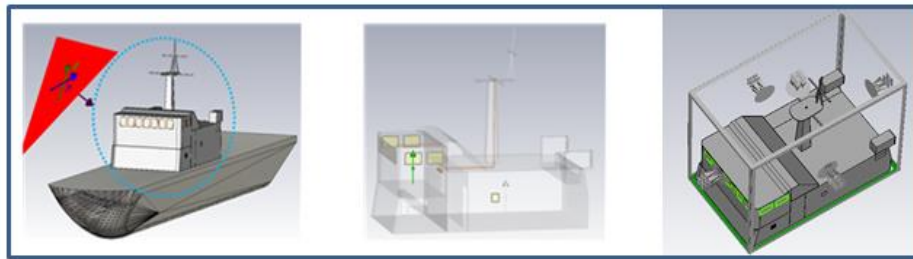


그림 4.2 해군 함정 Problem Space(조타실, 통신실)

## 4.2 Excitation Signal

EMP는 주로 Bell 연구소와 IEC 61000-2-9에서 제시하고 있는 기준을 따르는데, 이미 Bell 연구소와 IEC 61000-2-9 각각의 HEMP 파형 기준이 무한 도체 평판의 개구에 입사할 때, 개구를 통해 침투하는 침투 전계의 특성을 비교 검토한 논문이 있다[7]. 논문에 따르면 IEC-61000-2-9 기준이 Bell 연구소 기준보다 10MHz 이하의 낮은 주파수 대역을 제외하고 침투 전계가 크지만, 침투 전계

의 주파수 특성 경향은 거의 동일하다는 것을 알 수 있다. 한편 논문 [7]에서는 개구의 크기가 1mm~15cm이고 무한 도체 평판인 반면, 본 논문은 유리창의 크기 \*\*\*mm x \*\*\*mm(전면), \*\*\*mm x \*\*\*mm(측면)이고 함정 자체가 Cavity로 볼 수 있기 때문에 참고 논문과는 차이가 있다. 따라서 시뮬레이션상 위의 두 기준으로 함정 침투 전계를 확인하였다.

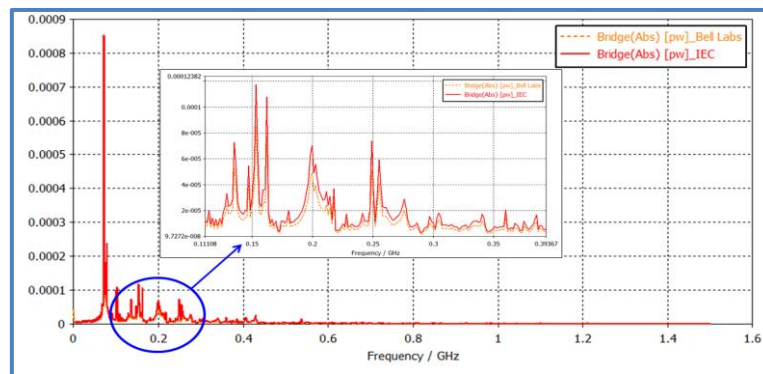


그림 4.3 조타실 침투전계의 주파수 특성(Bell Labs&IEC)

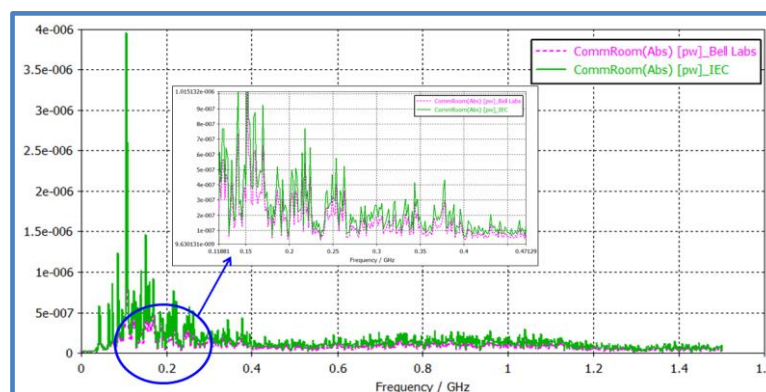


그림 4.4 통신실 침투전계의 주파수 특성(Bell Labs&IEC)

그림 4.3, 그림 4.4에서 보면, IEC 기준이 Bell 연구소 기준보다 9MHz이하의 저주파 대역을 제외하고 조타실, 통신실에서 침투 전계는 각각 28%, 34%정도 크지만, 침투 전계의 주파수 특성 경향은 거의 동일하다는 것을 알 수 있다. 따라서 IEC기준이 Bell 연구소 기준보다 좀 더 엄격한 기준이므로 IEC에서 정의한 EMP를 Excitation Signal로 적용하였다. 그림 4.5는 IEC기준의 Time domain상 그래프로써 5ns에서 50kV/m의 Peak 전압(V/m)이 측정되는데, 아주 짧은 시간에 강력한 전자기 펄스가 생성되는 것을 의미한다.

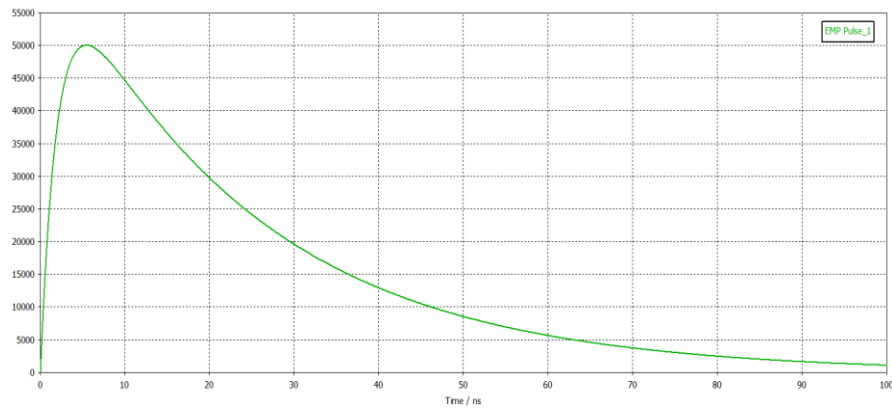


그림 4.5 Transient EMP waveform(IEC)

## 4.3 시뮬레이션 결과

### 4.3.1 복사성 결합(Back-door Coupling) 결과

Back-door는 Aperture나 Slot을 통해 결합되는 경로를 의미하는데 함정에서는 유리창이나 통풍관이 해당된다고 볼 수 있다. 우선, 그림 4.6은 함정 조타실의 차폐효율(Shielding Effectiveness)을 계산하기 위해 함정이 없다고 가정할 때, 자유공간상에서의 조타실 측정위치와 같은 위치에서 E-field를 계산한 그래프이다. E-field는  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ 성분의 합인  $\sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$  와 같다. 그것을 주파수 Domain으로 Fourier Transform(F.T)한 결과는 그림 4.7과 같다. 그리고 그림 4.8, 그림 4.9는 각각 함정이 있을 때의 조타실의 E-field를 Time-domain상 계산하고 그것을 F.T한 그래프이다.

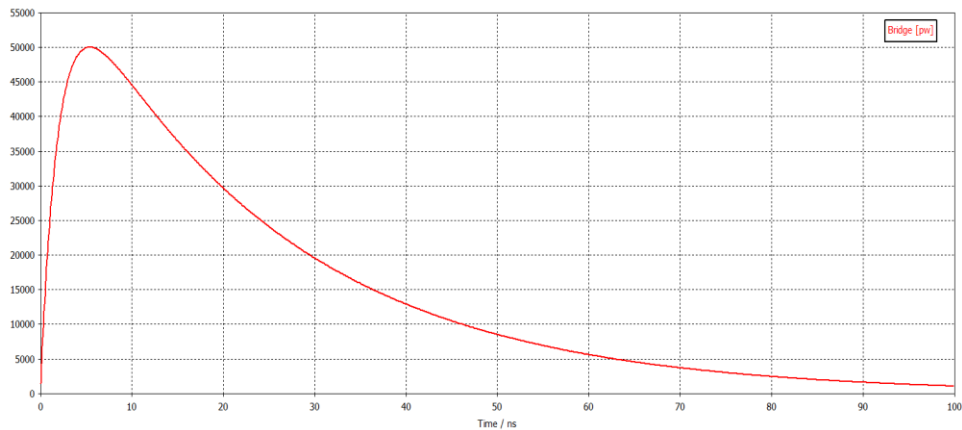


그림 4.6 자유공간에서의 Time-domain상 E-field(조타실)

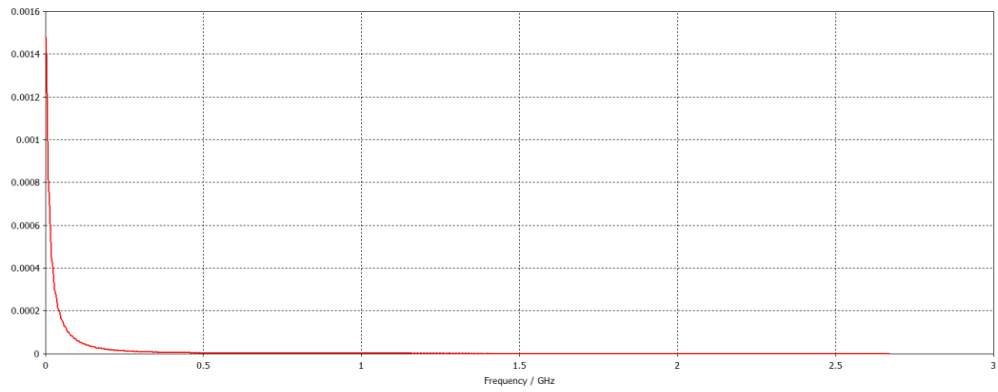


그림 4.7 자유공간에서의 Frequency-domain상 E-field(조타실)

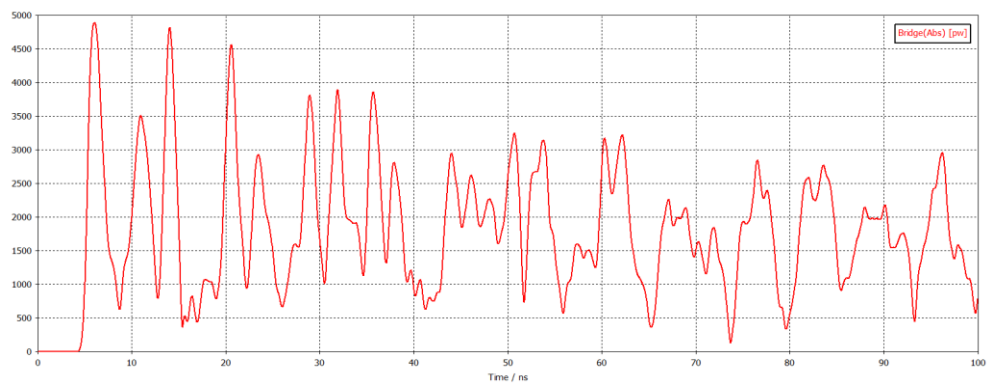


그림 4.8 Problem space에서의 Time-domain상 E-field(조타실)

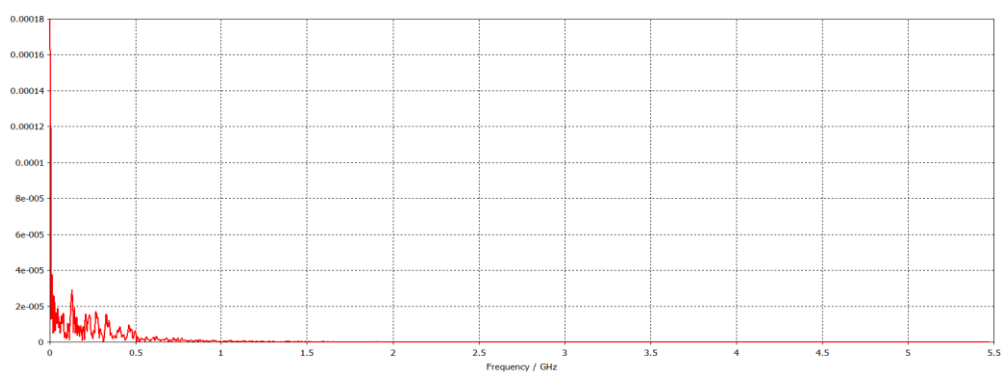


그림 4.9 Problem space에서의 Frequency-domain상 E-field(조타실)

위의 결과를 바탕으로 조타실의 차폐효율(Shielding Effectiveness)을 계산해보면 그림 4.10의 그래프를 얻을 수 있다.

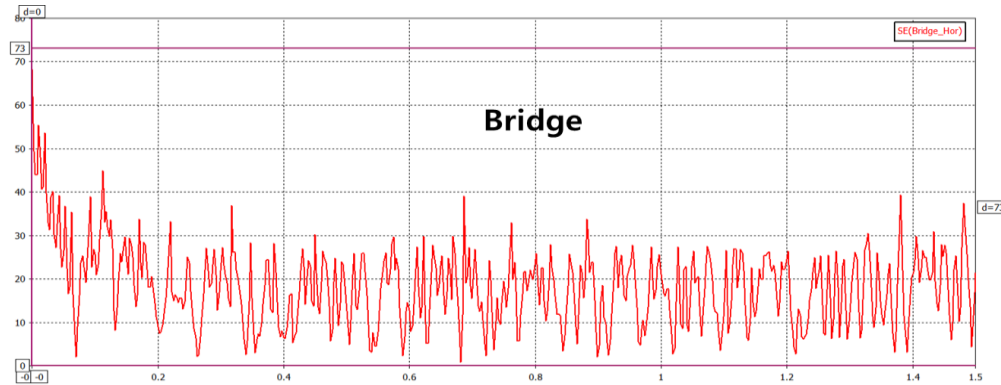


그림 4.10 조타실의 차폐효율(Shielding Effectiveness)

위의 결과를 보면 저주파 최대 차폐효율 68dB를 포함한 모든 주파수에서 기준인 수상함 차폐효율 73dB를 만족하지 못했다. 다음은 통신실의 경우를 조타실의 경우와 같은 방법으로 확인하였다. 그림 4.11은 함정이 없을 경우 자유공간에서의 통신실의 측정 위치와 같은 지점에서의 Time-domain상 E-field의 크기, 그림 4.12는 그림 4.11결과를 F.T하여 나타낸 E-field의 크기, 그림 4.13은 함정이 있을 경우 Problem space에서의 통신실 Time-domain상 E-field의 크기, 그림 4.14은 그림 4.13 결과를 F.T하여 나타낸 E-field 크기를 각각 나타낸다.

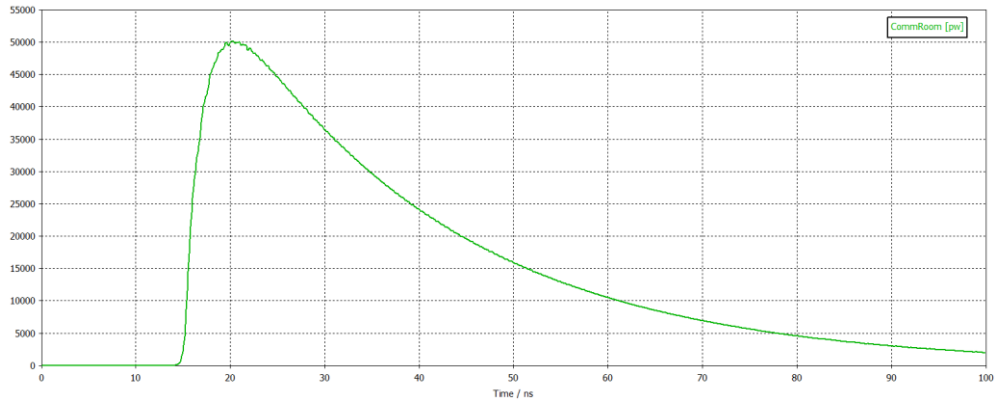


그림 4.11 Free space에서의 Time-domain상 E-field(통신실)

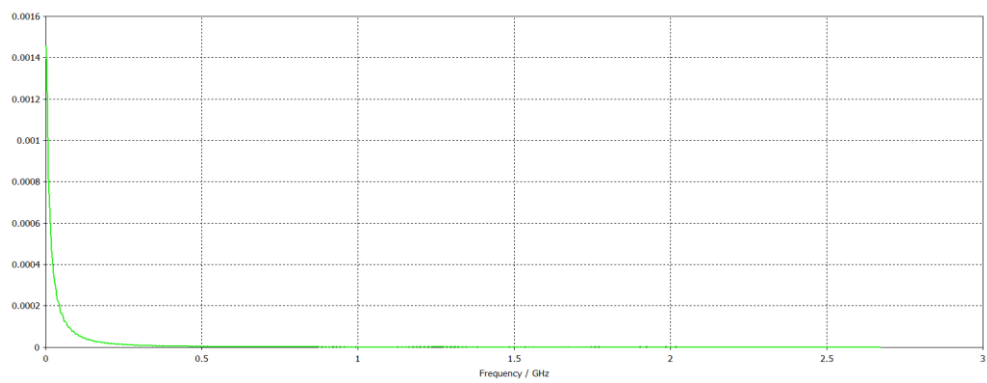


그림 4.12 Free space에서의 Frequency-domain상 E-field(통신실)

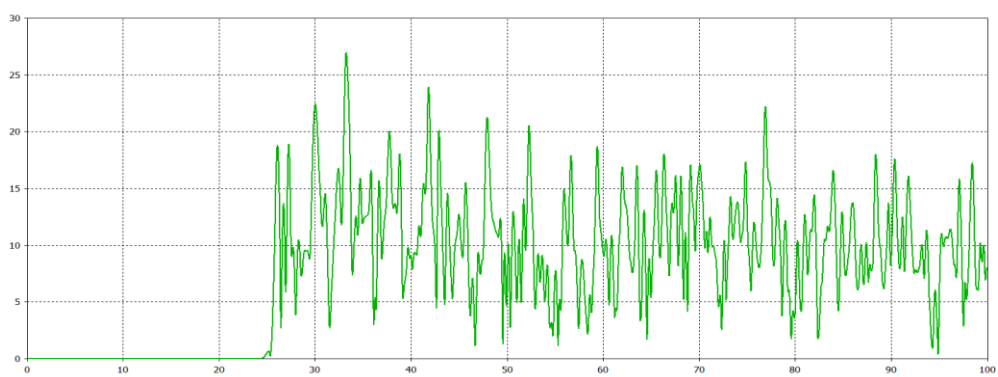


그림 4.13 Problem space에서의 Time-domain상 E-field(통신실)

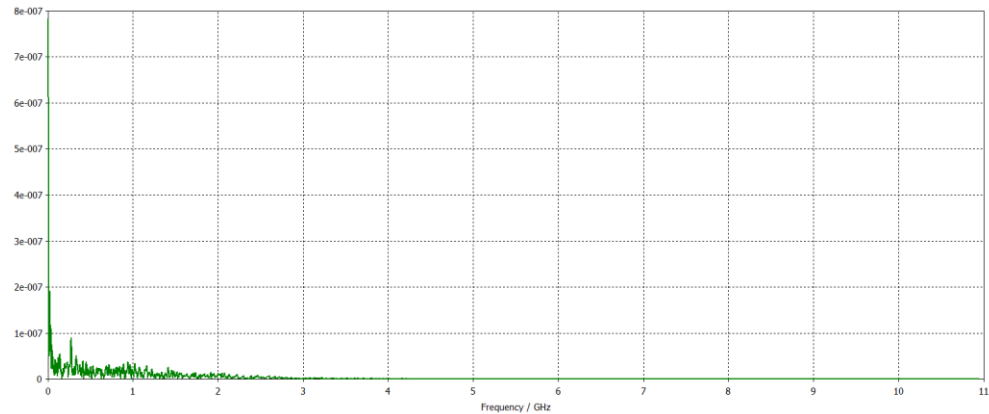


그림 4.14 Problem space에서의 Frequency-domain상 E-field(통신실)

그림 4.11에서 보면 함정 정면에서 입사할 경우 조타실보다 통신실의 위치가 상대적으로 더 멀기 때문에 전기장도 시간 지연 후 나타난다. 결과를 바탕으로 통신실의 차폐효율을 계산해보면 그림 4.15의 그래프 결과를 얻을 수 있다.

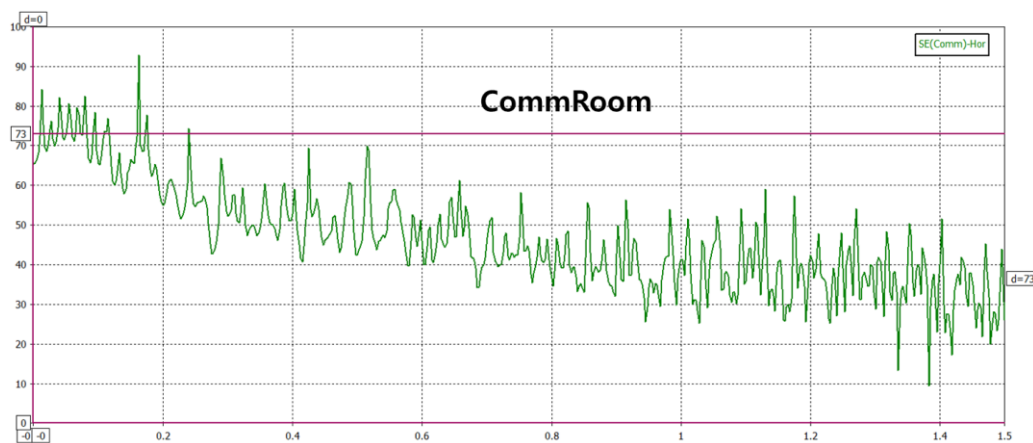


그림 4.15 통신실의 차폐효율(Shielding Effectiveness)



위의 결과를 보면 통신실도 조타실과 유사하게 미국방부에서 제시한 0~1.5GHz 대역에서 일부 대역대(0~25MHz)를 제외하고 차폐효율 73dB를 만족하지 못한다. 따라서 EMP 입사시 조타실과 통신실의 전자장비에 장애 또는 파괴현상이 유발될 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였고 그에 따른 대책 또한 필요함을 알 수 있었다.

#### 4.3.1.1 EMP 함정내부 침투 기여도 분석

EMP 입사시 침투에 취약한 지점에서의 침투 기여도를 살펴보는 것이 중요하다. 먼저 함정에서 EMP에 취약한 곳은 유리창(11), 전부 통풍관(2), 후부 통풍관(2) 등이며, 시뮬레이션으로 각각 EMP 침투 기여도를 살펴보면 그림 4.16과 같다.

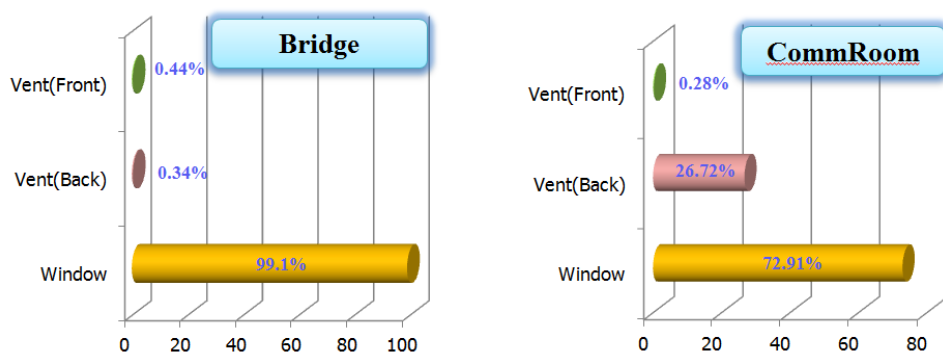


그림 4.16 조타실·통신실 EMP 침투 기여도

조타실은 전자기적으로 개구라 할 수 있는 부분인 유리창의 개수가 가장 많고 EMP로부터 가장 가까운 곳에 위치해 있으므로 유리창의 영향이 가장 크며, 기타 통풍관의 영향은 미미하나, 전부 통풍관, 후부 통풍관순으로 영향이 큼을 확인할 수 있다. 통신실의 EMP 침투 기여도는 유리창의 영향이 가장 크나, 조타실에 비해서 통풍관의 영향이 더 큰 것을 알 수 있다. 이것은 통신실 격실 자체가 EMP로부터 상대적으로 멀리 위치해 있고, 뒤쪽 통풍관이 통신실로 직접 연결되어 있기 때문에 생긴 결과로 볼 수 있다.

#### 4.3.1.2 EMP 입사방향에 따른 결과 분석

EMP가 정면, 비스듬히, 수직으로 입사함에 따라서 전기장의 세기도 달라진다. 아래 그림 4.17을 보면 EMP에 취약한 유리창과 통풍관이 가장 가까이 있는 정면의 방향이 침투 전계의 세기가 가장 클 것이라 예상되고, 실제 시뮬레이션의 경우도 예상과 같았다. 하지만, 통신실의 경우는 뒤쪽 통풍관과 옆쪽의 현창의 영향이 있으므로 시뮬레이션으로 결과를 통해 확인할 수 있었다.

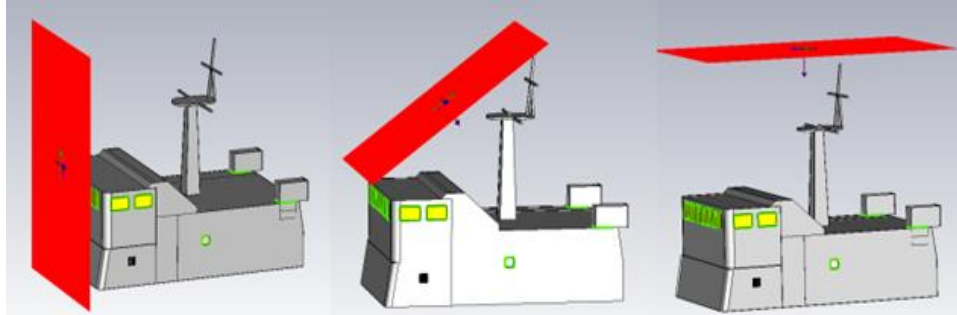


그림 4.17 EMP 입사방향(Horizontal, Oblique, Vertical)

그림 4.18는 EMP 입사방향에 따른 조타실내 E-field의 크기를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 Peak 수치를 비교해보면 정면으로 입사시 4888V/m, 비스듬히 입사시 4190V/m, 수직으로 입사시 2690V/m으로 정면에서 가장 크고, 다음으로 비스듬히, 수직 방향은 가장 작은 것으로 나타났다.

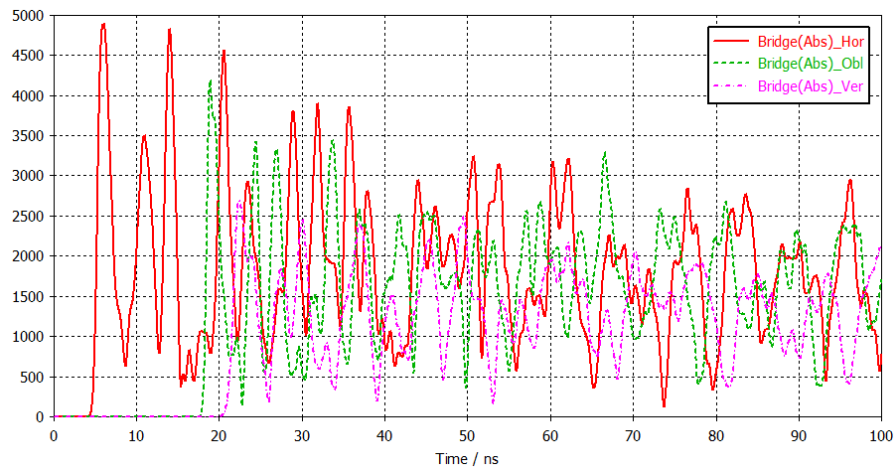


그림 4.18 EMP 입사방향에 따른 조타실내 E-field 크기

그림 4.19는 EMP 입사방향에 따른 통신실내 E-field의 크기를 나타낸다. Peak 수치를 비교해보면 수직으로 입사시 52.2V/m, 비스듬히 입사시 38V/m, 정면에서 입사시 27V/m로 조타실의 결과와 정반대 순서로 E-field의 세기가 높았다. 통신실의 경우 EMP에 영향을 받는 현상이 구조물 측면(왼쪽)에 위치해있고, 구조물 뒤쪽에 위치한 통풍관의 영향으로 인해 이러한 결과를 나타냈다고 생각해 볼 수 있다. 또한 통신실 측정지점의 위치가 조타실 측정지점보다 구조물 안쪽에 있기 때문에 전기장이 형성되는 시간도 그림 4.19에서 보는 바와 같이 시간 지연이 있음을 확인할 수 있다.

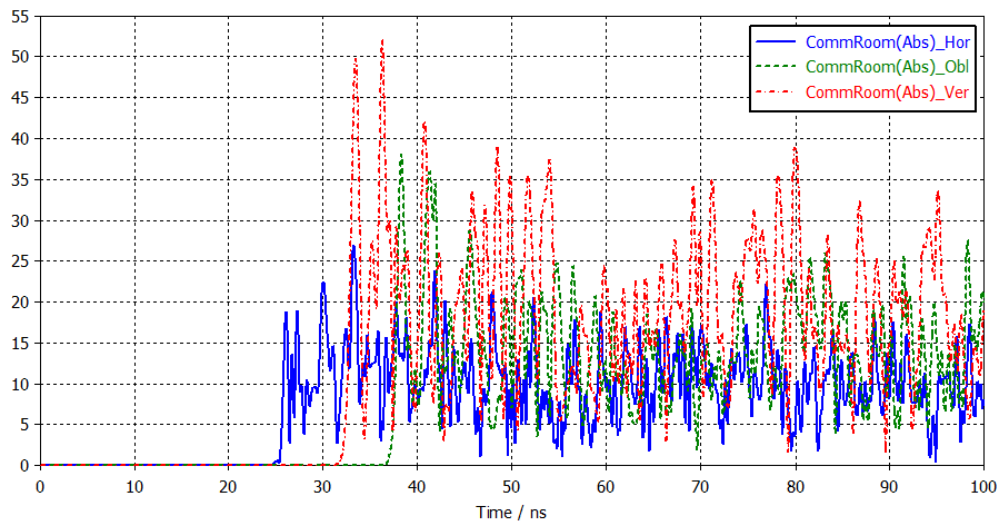


그림 4.19 EMP 입사방향에 따른 통신실내 E-field 크기

#### 4.3.1.3 EMP Polarization 방향에 따른 결과 분석

EMP는 Plane Wave이므로 Polarization 방향에 따라서도 미치는 영향이 다르다. 본 연구에서는 E-field를 수직, 수평으로 하고 진행 방향이 함정쪽으로 향하게끔 H-field를 각각 대응시켜 영향을 살펴 보았다. 정면에서 EMP 입사시 E-field를 수직으로 하였을 경우와 수평으로 하였을 경우의 조타실과 통신실의 전기장 세기를 비교하였다. 그림 4.20에서 보듯이 EMP가 정면에서 입사할 때 Peak 수치를 살펴보면 조타실에서 E-field를 수평으로 하였을 경우 5309V/m, 수직으로 하였을 경우 4888V/m보다 약간 크게 나타남을 알 수 있고, 통신실에서는 역시 수평으로 하였을 경우 125V/m, 수직으로 하였을 경우 27V/m보다 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

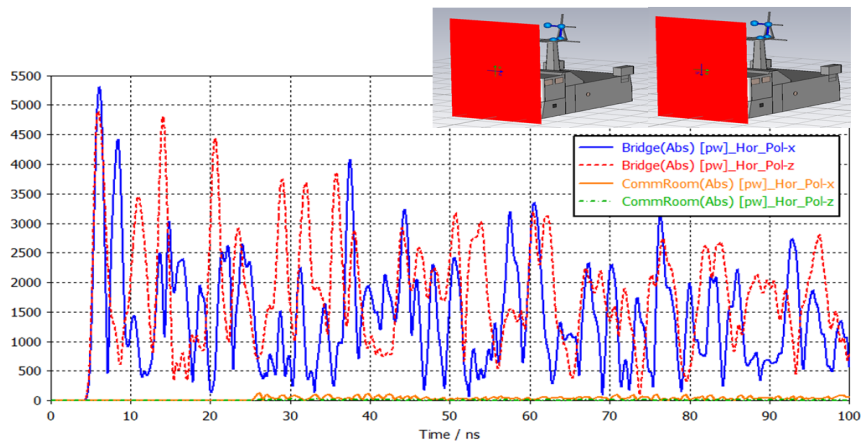


그림 4.20 Polarization 방향에 따른 E-field 크기(정면 입사)

EMP가 비스듬히 입사하였을 경우에도 정면 입사와 동일하게 E-field를 수평으로 하였을 경우가 전기장의 세기가 크게 나타났다. 그림 4.21에서 Peak수치를 살펴보면 조타실에서 E-field를 수평으로 하였을 경우 4263V/m, 수직으로 하였을 경우 4190V/m이며, 통신실에서는 수평으로 하였을 경우 136V/m, 수직으로 하였을 경우 38V/m으로 나타났다.

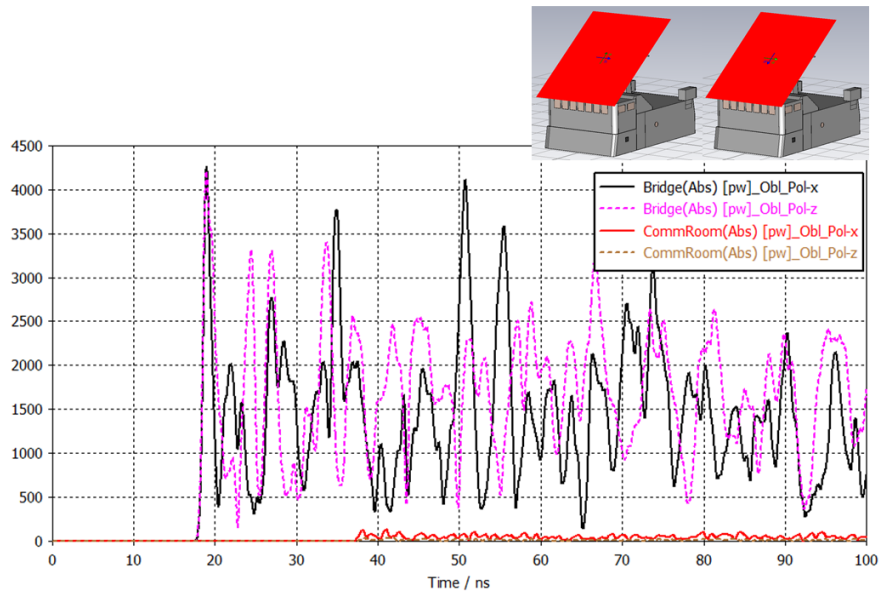


그림 4.21 Polarization 방향에 따른 E-field 크기(비스듬히 입사)

EMP가 수직으로 입사하였을 경우에도 정면 입사, 비스듬히 입사 할때와 동일하게 E-field를 수평으로 하였을 경우가 전기장의 세기

가 크게 나타났다. 그림 4.22에서 Peak수치를 살펴보면 조타실에서 E-field를 수평으로 하였을 경우 3773V/m, 수직으로 하였을 경우 2674V/m이며, 통신실에서는 수평으로 하였을 경우 140V/m, 수직으로 하였을 경우 50V/m으로 나타났다.

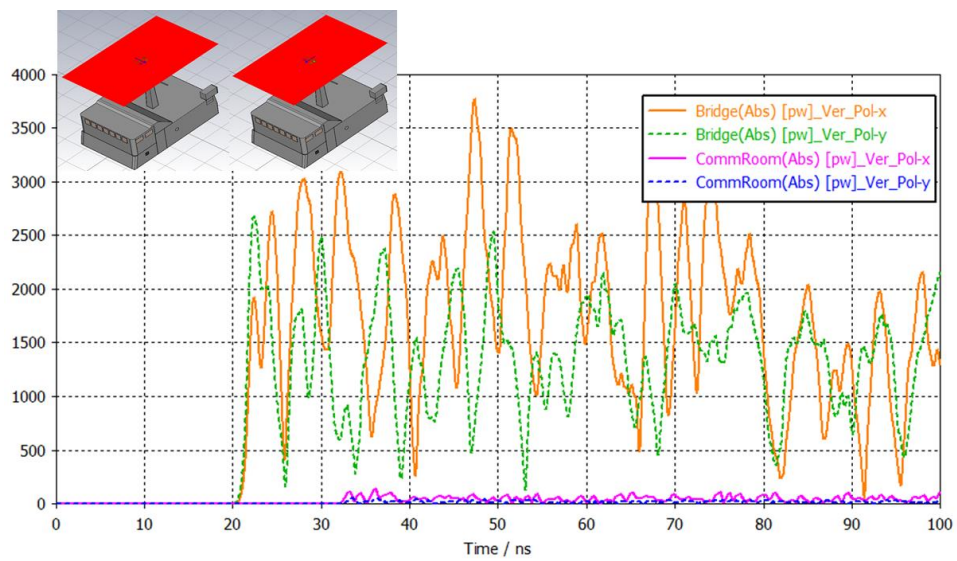


그림 4.22 수직으로 EMP 입사시 Polarization 방향에 따른 E-field 크기

### 4.3.2 전도성 결합(Front-door Coupling) 결과

#### 4.3.2.1 CST Cable Studio(CST-CS) 정확도 분석

Front-door는 Antenna 혹은 Transmission line을 통해 결합되는 경로를 의미하는데 본 연구에서는 Antenna Cable를 통해 HEMP가 유입되는 전도성 피해에 대해 다루었다. 앞서 복사성 결합 결과는 CST Microwave studio(CST MW)를 이용하여 시뮬레이션 결과를 확인하였지만, 전도성 결합 결과는 Cable 해석에 특성화된 CST Cable Studio(CST CS)를 이용하여 시뮬레이션 결과를 확인하였다. 우선 시뮬레이션의 정확도를 확인하기 위하여 1.5m의 Coaxial cable(RG-58)의 감쇄상수( $\alpha$ )를 이론 및 인터넷 계산기, CST MW로 확인하고 그것을 CST CS와 비교하였다.

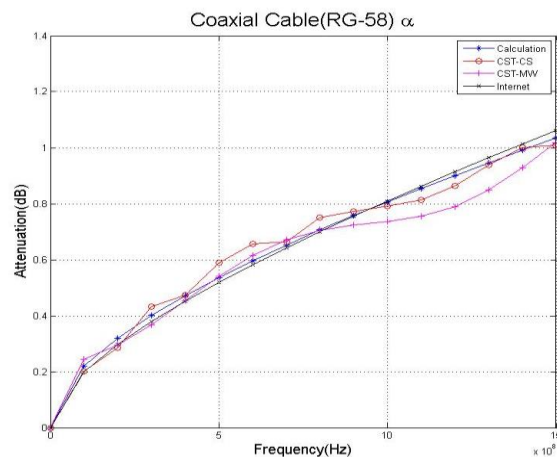


그림 4.23 Coaxial cable(RG-58/1.5m)의 감쇄상수



그림 4.23에서 보듯이 각각의 결과가 경향성이 같고 수치도 거의 일치함을 알 수 있는데, 특히 이론과 인터넷 계산기의 결과는 식(4.1)의 서로 같은 수식을 사용함으로 결과가 정확히 일치한다.

$$\alpha = \frac{1}{2} \left( R \sqrt{\frac{C}{L}} + G \sqrt{\frac{L}{C}} \right) = \frac{1}{2} \left( \sqrt{\frac{R_s}{\eta \ln \frac{b}{a}}} \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) + \omega \varepsilon'' \eta \right) \quad \text{식 (4.1)}$$

그림 4.24는 CST MW를 이용한 Coaxial Cable의 S21 시뮬레이션 결과이다. CST MW는 Coaxial Cable의 물성정보를 바탕으로 직접 모델링하고 Port를 양 끝단에 달아 S21 특성을 확인한 결과이다. S21의 그래프를 감쇄상수의 그래프로 바꾸면 위의 그림 4.23의 결과를 얻을 수 있다.

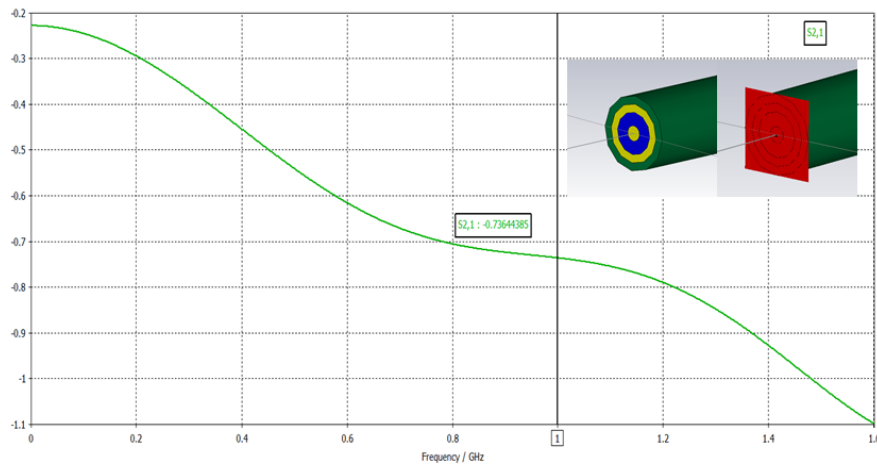


그림 4.24 CST MW를 이용한 Coaxial cable의 S21 시뮬레이션

그림 4.25은 1.5m Coaxial cable을 CST CS를 이용하여 모델링한 것이고 그림 4.26은 cable 모델링한 것을 CST Design Studio와 연동하여 나타낸 회로도(Schematic)이다.

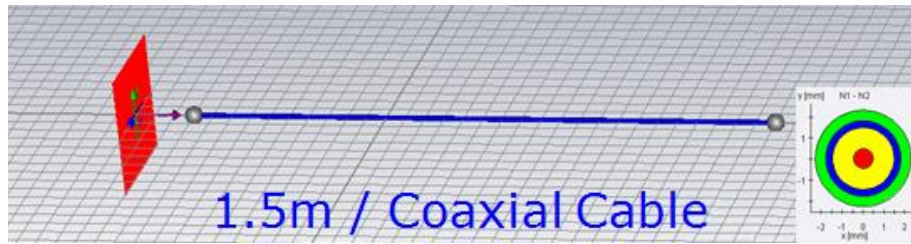


그림 4.25 CST CS를 이용한 Coaxial cable 모델링

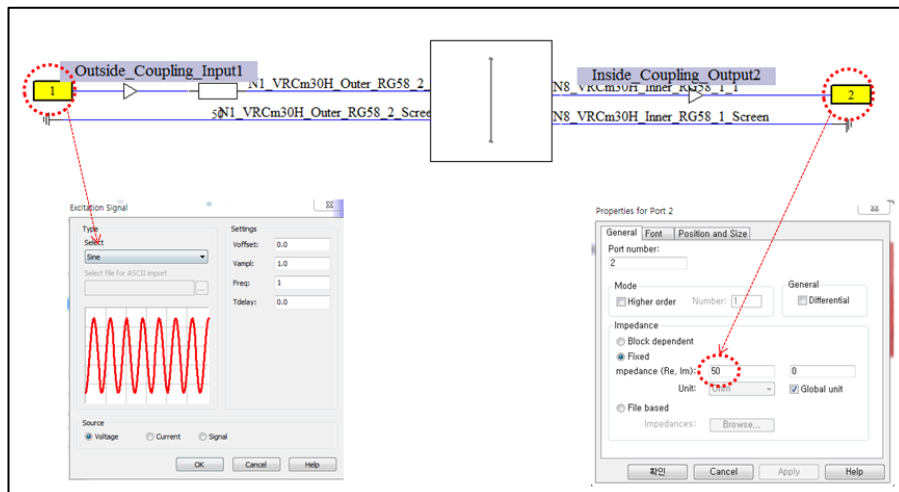


그림 4.26 CST DS를 이용한 Coaxial cable 회로도

회로도에서 블록상 네 가지의 신호선이 존재하는데 왼쪽은 Node1, 오른쪽은 Node2의 Cable을 의미한다. 즉, 양쪽 끝단의 정보를 나타내는데 그 중 RG58은 신호가 직접 이동하는 신호선이고 Screen은

접지선이다. 따라서 신호선에는 Input과 Output을 확인하는 Probe를 위치하고 신호를 줄 수 있는 Port 또한 연결하며 접지선은 Ground 처리한다. Input 신호에 일정한 주파수를 가지는 Sine파를 넣어서 Output에서의 신호가 어떻게 나오는지 확인하여 감쇄상수를 구할 수 있다. 그림 4.26에서는 Power Amplitude가 100인 1GHz의 Sine신호를 넣었는데, Output에서 Power가 83.3이 나와서 감쇄상수  $\alpha = 10\text{Log}_{10}\left(\frac{100}{83.327881}\right) = 0.7914\text{dB}$  을 확인하였다. 같은 방법으로 0~1.5GHz까지 100MHz 간격으로 Sweep하여 주파수별 감쇄상수를 확인한 결과 그림 4.23과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 결론적으로 네 가지 방법으로 1.5m의 Coaxial cable의 감쇄상수를 비교했을 때 약간의 오차를 제외하고 거의 같은 결과를 얻었으므로 CST CS의 모델링 및 회로도(Schematic) 방법이 옳은 방법이라는 것을 확인했다.

#### 4.3.2.2 함정의 안테나 Cable 결합 결과

함정의 안테나 Cable은 그림 4.27과 같이 세 개의 Coaxial cable(RG-00)이 묶음으로 되어 있으며, 앞에서 검증된 CST CS로 모델링하였다.

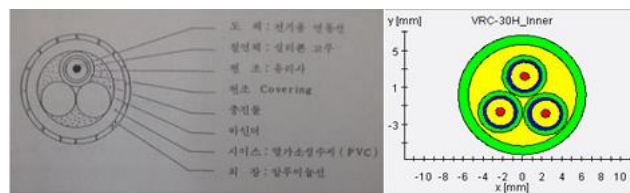


그림 4.27 함정의 안테나 케이블 및 모델링

위 모델링을 바탕으로 CST DS를 이용하여 회로도(Schematic)로 연동하면 그림 4.28과 같이 나타나고 3장에서 제시한 전도성 HEMP 신호를 인가하였을 때 함정 내부에서의 잔류전류를 측정하였다.

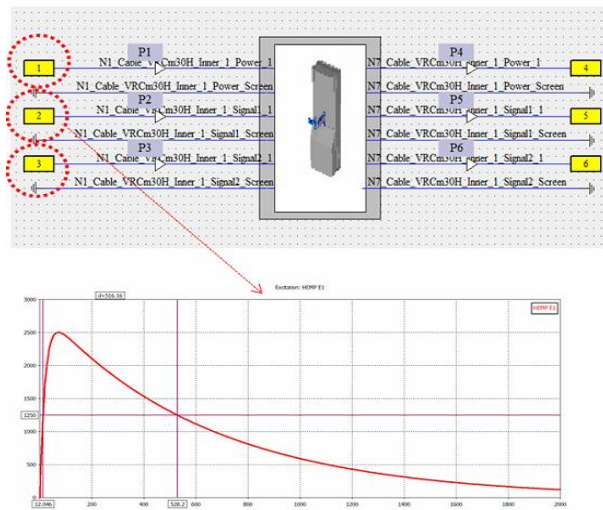


그림 4.28 함정 안테나 케이블 회로도 및 인가파형

P1~P3는 신호를 인가하는 Input, P4~P6는 함정 내부에서의 잔류 전류를 측정하는 Output이다. 안테나 케이블을 통해 유입된 최대 진폭 2,500A의 HEMP 신호는 아래 그림 4.29에서 보듯이 2,390A로 진폭이 감소하였음을 확인하였다. 이는 Coaxial cable의 감쇠로 인한 결과이며, 8.5m의 케이블을 통과하면서 Output 결과는 그래프에서 보듯이 42.132ns만큼 Time delay가 발생하였다.

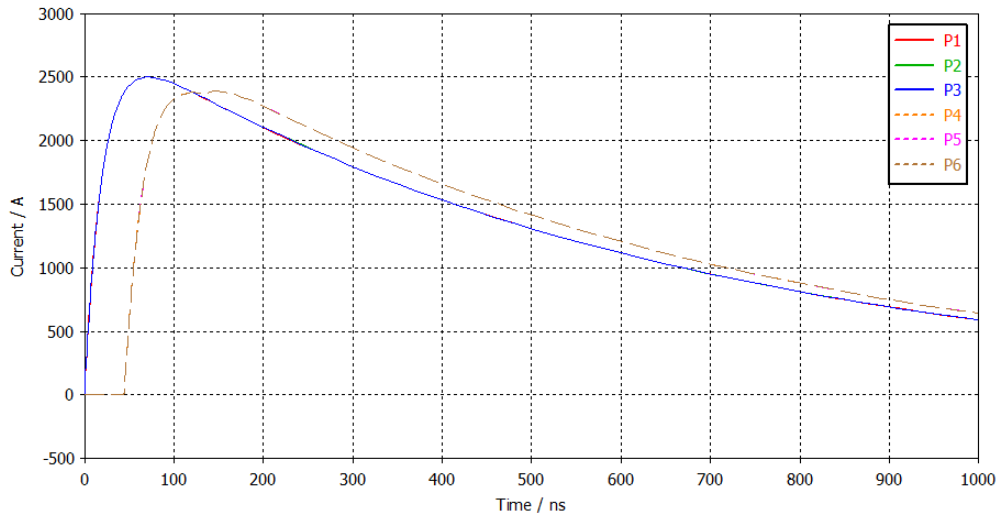


그림 4.29 함정 안테나 유입 전류 Input 및 Output

Coaxial cable의 Time delay식에 따라 결과를 비교하면 다음 식 (4.2)와 같다.

$$\tau_d = 3.33\sqrt{\epsilon_r} \text{ ns/m} \quad \text{식 (4.2)}$$

Coaxial cable의 유전체는 폴리에틸렌으로 유전율이 2.3이다. 따라서 식(4.2)에 대입해보면  $3.33\sqrt{2.3} = 5.05 \text{ ns/m}$  이고 케이블 길이 8.5m를 곱하면  $5.05 \frac{\text{ns}}{\text{m}} \times 8.5\text{m} = 42.925\text{ns}$ 의 결과를 얻는데 시뮬레이션 결과와 일치한다. 함정내부에 2,390A의 잔류전류는 송수신 안테나 허용 전류 한계치인 1A와는 너무나 큰 수치이고 이러한 전류가 내부로 유입되면 안테나 신호 처리 System은 오작동 및 고장발생 가능성이 커진다.

## 제 5 장 대책 및 적용

### 5.1 EMP 방호대책

일반적으로 민감한 전자 장비를 고출력 전자기파로부터 보호하기 위해서는 차폐실을 만들고 그 내부에 전자장비를 설치하면 EMP 방호가 가능하다. 하지만 함정은 그림 5.1(a)처럼 외부와의 통신을 위해서 안테나와 수신단간의 안테나선 및 전원선과 실내 환기 및 장비의 적정 온도를 유지시킬 수 있는 통풍관, 그리고 항해를 위한 유리창 및 현창이 반드시 필요하다. 따라서 그림 5.1(a)와 같이 EMP 에너지가 유입된다. 이를 차단하기 위해서 그림 5.1(b)와 같이 전원선, 신호선에 EMP필터를 사용하고, 통풍관 등은 도파관 차단 주파수 율리를 이용한 Waveguide-Below-Cutoff 기술을 적용해야 한다[8].

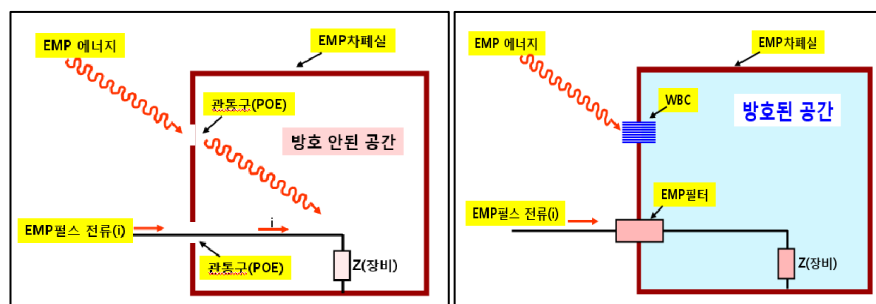


그림 5.1(a) 방호 안 된 공간

그림 5.1(b) 방호된 공간

EMP 에너지 차단을 위해 MIL-STD-188-125 에서 제시하는 핵심적인 방호대상은 차폐실과 차폐실내로 연결되는 각종 POE(Points-of-Entry)들이다. 이 POE 중 함정에 해당되는 유리창, 통풍관, 안테나선 등에 대한 일반적인 방호대책과 함정에 적용한 방호대책을 아래 표 5.1 에 정리하였다.

구 분		방호대책	함정 방호대책
물리적 POE	유리창	차폐 코팅	차폐 코팅
	통풍관	WBC, 허니컴 어레이	WBC, 허니컴 어레이
전기적 POE	안테나	EMP filter, 어레스터, 바리스터	TVS
차폐관		1.5~6.5mm 철판	00cm 철판

표 5.1 EMP 함정 방호대책



## 5.2 시뮬레이션 적용 결과

먼저, Back-door Coupling을 통한 복사성 EMP 방호대책을 시뮬레이션을 통해 적용하였다. 미국방부 기준인 MIL-STD-188-125-1을 만족시키기 위해서 그림 5.2와 같이 차폐 코팅을 실내 및 실외에 붙이고, 통풍관에 Honeycomb 모양의 통풍관을 적용하였다.

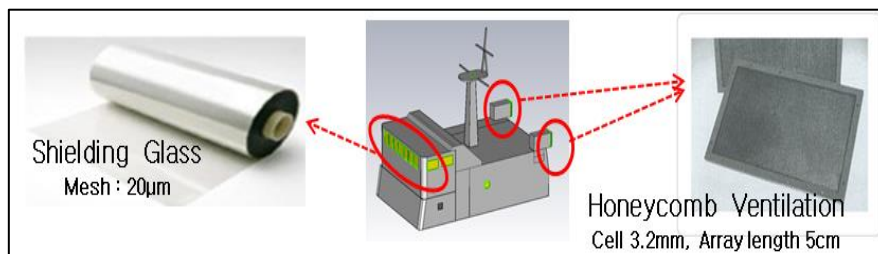


그림 5.2 복사성 EMP 방호대책(차폐 코팅, 허니컴 통풍관)을 적용한 함정

차폐 코팅재료는 구리이며 mesh(그물망)로 이루어져 있고 mesh간격은 20um이다. Honeycomb 통풍관은 cell 간격이 3.2mm이고 WBC(Waveguide-Below-Cutoff) 원리에 의거 Array length는 5cm로 정하였다. 다음으로 Front-door Coupling을 통한 전도성 EMP 방호대책은 그림 5.3과 같이 TVS 소자를 적용하였다. TVS 소자는 Transient Voltage Suppression Diode로 정전기 방전이나 유도부하 스위칭 혹은 유도방전에서 발생하는 전기적 과도상태로부터

약한 회로를 방지하기 위해 사용하는 소자이다. TVS의 원리는 회로의 손상을 줄만큼의 과도한 전류가 유입되면 TVS가 즉시 “제한전압(Clamping Voltage)” 이라고 불리는 안전전압을 제한시키고 동시에 잠재적인 회로 손상전류를 전도시킴으로써 더 이상의 보호요소가 되지 못하도록 하는 것이다.

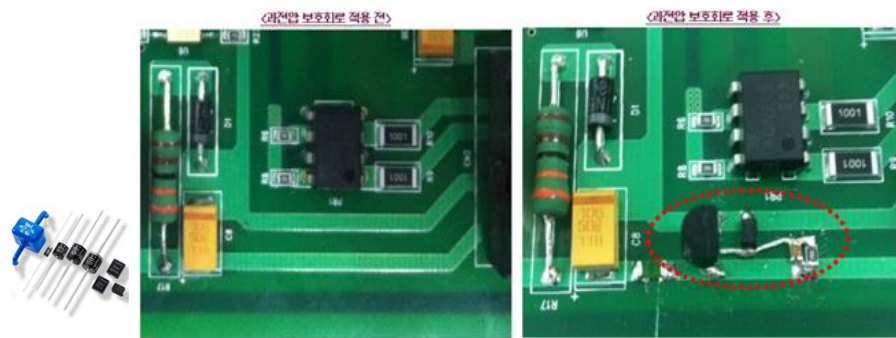


그림 5.3 전도성 EMP 방호대책인 TVS 소자

복사성, 전도성 EMP 방호대책을 적용한 시뮬레이션 세부사항 및 결과는 5.2.1항, 5.2.2항에 각각 기술하였다.

### 5.2.1 복사성 결합(Back-door Coupling) 결과

그림 5.4는 합정 조타실의 방호대책(차폐 코팅, Honeycomb 통풍관)을 수립하였을 때 시간에 따른 E-field값을 나타낸 그래프이고, 아래 그림 5.5은 그것을 F.T한 그래프이다.

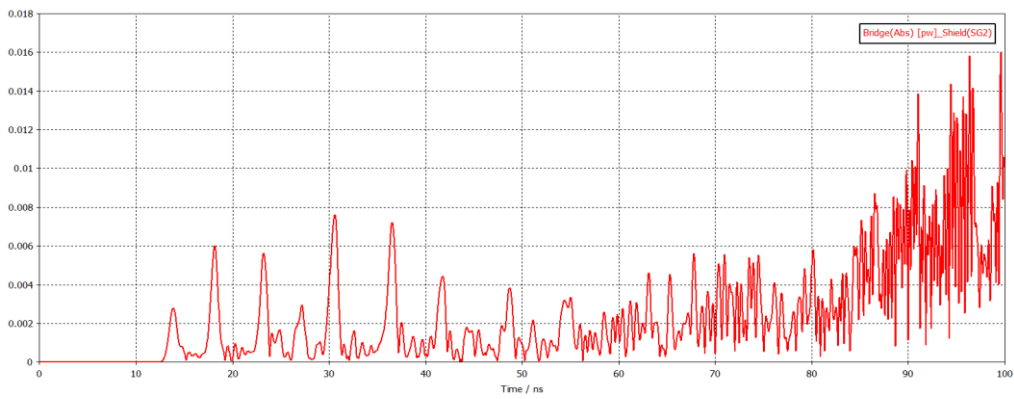


그림 5.4 방호대책을 적용한 Time-domain상 E-field(조타실)

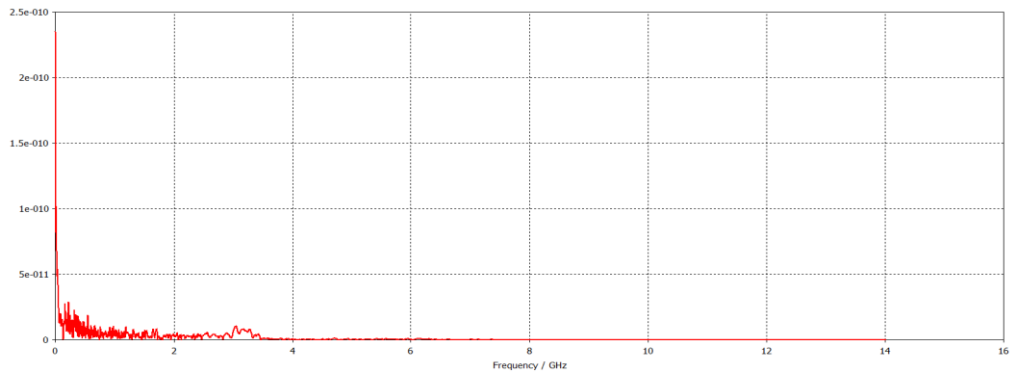


그림 5.5 방호대책을 적용한 Frequency-domain상 E-field(조타실)

4장 그림 4.7에서 자유공간에서의 Frequency-domain상 E-field(조타실)의 결과와 함께 차폐효율 계산식을 이용하여 차폐효율을 계산해 보면 그림 5.6의 그래프를 얻을 수 있다.

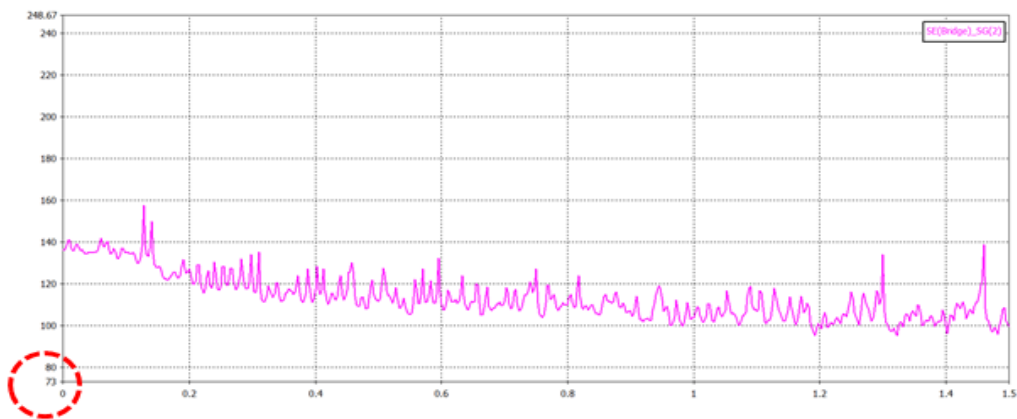


그림 5.6 방호대책 적용된 조타실의 차폐효율

그림 5.7은 통신실의 방호대책을 수립하였을 때 시간에 따른 E-field값을 나타냈고, 그림 5.8은 그것을 F.T한 그래프이다.

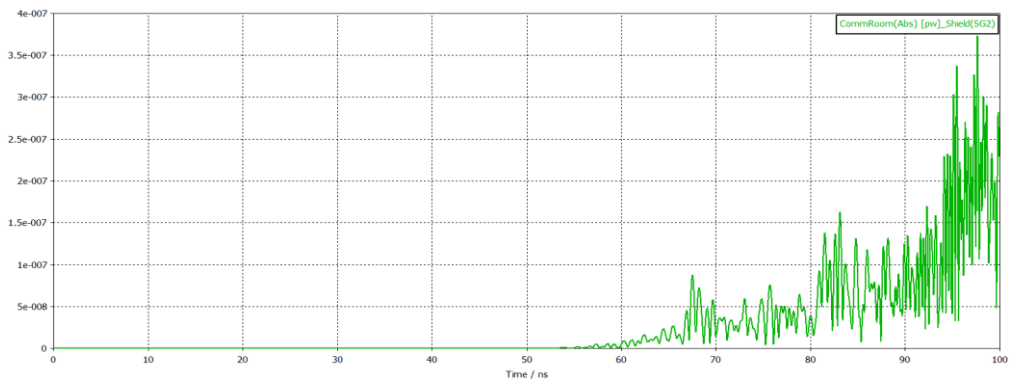


그림 5.7 방호대책을 적용한 Time-domain상 E-field(통신실)

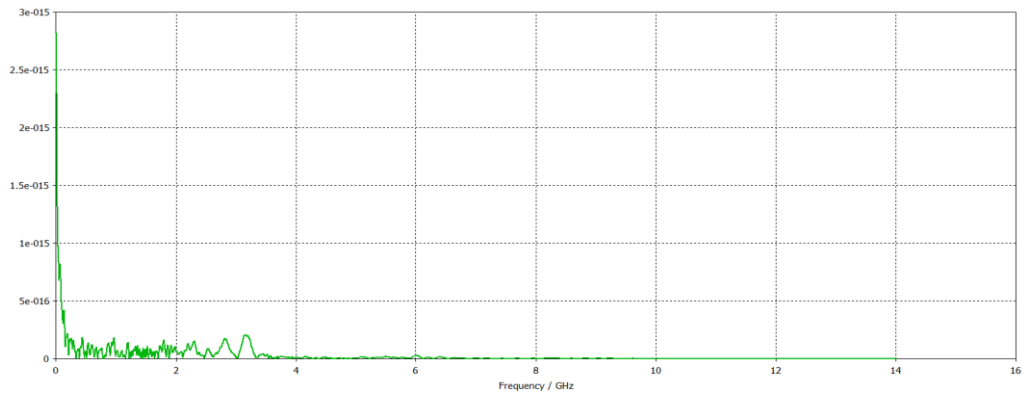


그림 5.8 방호대책을 적용한 Frequency-domain상 E-field(통신실)

같은 방법으로 그림 4.12의 결과와 함께 방호된 통신실의 차폐효율을 계산해 보면 그림 5.9와 같은 결과를 얻을 수 있다.

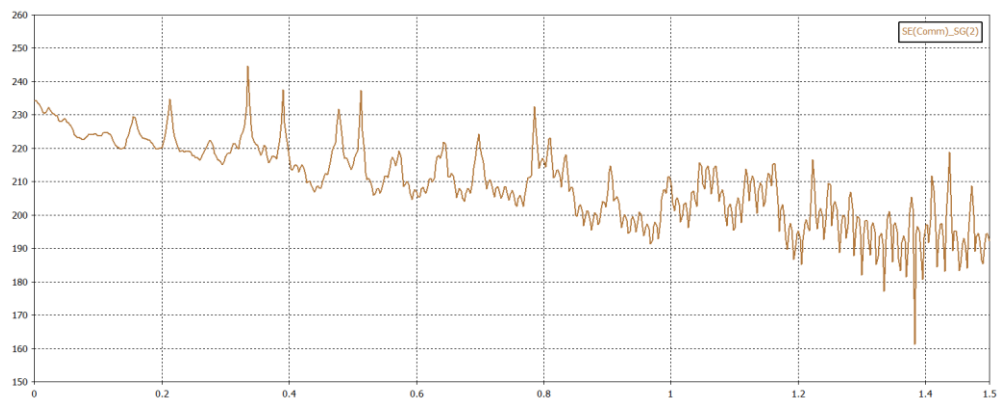


그림 5.9 방호대책 적용된 통신실의 차폐효율

## 5.2.2 전도성 결합(Front-door Coupling) 결과

CST DS 를 이용하여 (주) On Semiconductor 에서 제공하는 TVS NSA5.0AT 의 Datasheet 를 바탕으로 아래 그림 5.10 과 같이 회로도(Schematic)를 구성하여 결과를 확인하였다.

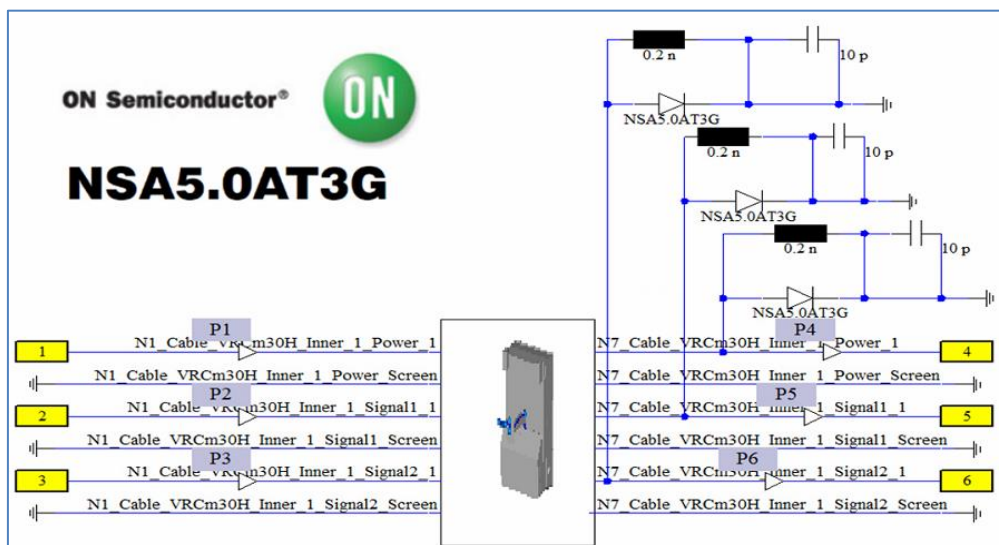


그림 5.10 TVS 소자를 적용한 회로도(Schematic)

위 회로도를 이용하여 시뮬레이션한 결과 그림 5.11 에서 보듯이 Output P4~P6 에서 잔류전류 0.8A 를 나타내어 미국방부 송수신 안테나 허용 잔류전류 1A 이내의 기준을 만족함을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

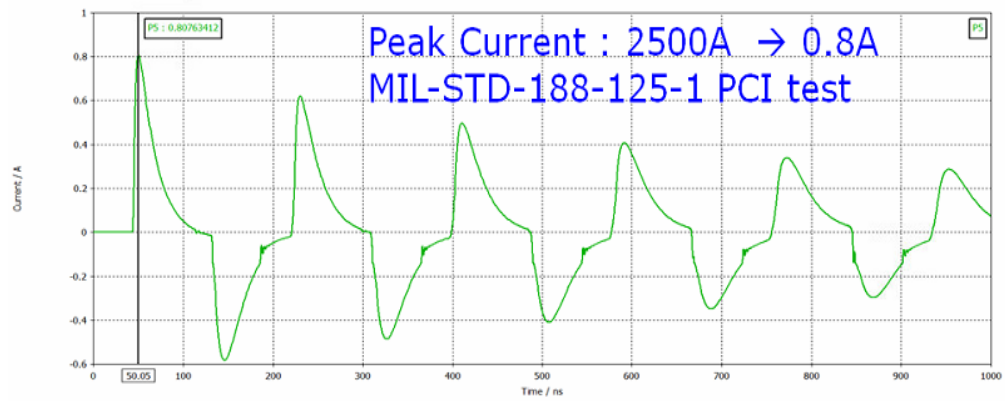


그림 5.11 TVS 소자를 적용한 회로의 잔류전류 결과

## 제 6 장 결 론

본 논문을 통해 HEMP 기준 중 함정으로의 침투전계가 상대적으로 크게 나타나는 IEC 61000-2-9 기준을 해군의 HEMP 기준으로 제시하였다. 또한 두 경로를 통해 침투하는 HEMP 중 복사성 결합(Coupling)은 차폐 코팅, Honeycomb 통풍관을 이용해 차폐효율(SE) 73dB 이상을 만족하였고, 전도성 결합은 TVS 소자를 회로에 삽입하여 내부 잔류전류 0.8A 로 기준에 충족하는 방호대책을 확인하였다. 본 연구를 통해 해군 함정은 철과 유리창으로 수밀되어 있어 방수, 화학·생물학 가스 방호에 유리하지만, EMP 와 같은 전자기파는 전자기적으로 개구로 볼 수 있는 유리창과 안테나를 통해 주로 입사되므로 설계시 이 부분에 대한 방호를 반드시 고려해야 한다. EMP 측정(장비 손상)의 제한으로 실측정이 불가한 점은 아쉽지만, 미래 함정을 대상으로 실측정의 연구가 진행될 것으로 기대한다.



## 부록 A 비핵 전자기펄스에 의한 영향 및 대책

### A.1 비핵 전자기펄스의 기본개념

1970 년대 이후로 고출력 펄스 전력(pulse power) 발생 기술과 고속 스위칭 등을 이용한 펄스형성(pulse forming) 기술, 고주파 발전 그리고 고출력 안테나 개발 기술의 지속적인 발전으로 핵을 사용하지 않고도 강력한 전자기 펄스를 발생시킬 수 있는 기반기술이 형성되어 왔다[10]. 비핵 전자기 펄스 발생과 관련된 기술은 현재 여러 나라에서 많은 연구가 이루어지고 있으며 전자기펄스 무기의 개발을 위한 연구가 미국, 러시아, 영국, 프랑스, 독일, 중국, 일본을 비롯한 세계 20 여개 국가에서 수행되고 있는 것으로 알려져 있다[11].

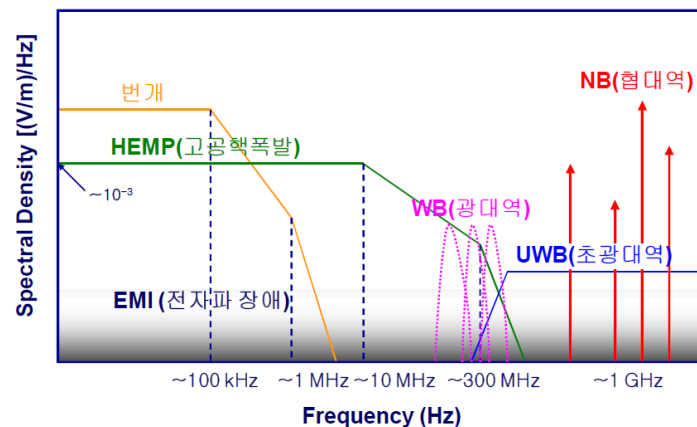


그림 A.1 다양한 전자기펄스의 주파수 분포

전자기 펄스는 주파수의 대역폭에 따라 그림 A.1 과 같이 여러 가지 형태의 전자기펄스로 나뉜다. 앞서 본 논문에서는 핵 폭발로 인한 전자기펄스(HEMP)가 해군 함정에 대한 영향을 살펴 보았는데, 연구의 범위를 확장하여 비핵 전자기펄스에 의한 영향을 부록 A 에서 살펴보고자 한다. 흔히 비핵 전자기펄스는 인위적인 전자폭탄에 의해 발생하는데 전자기펄스 발생장치의 특성에 따라 주파수 성분이나 분포가 달라진다[12]. 본 부록에서는 UWB 형태의 전자기펄스에 의한 해군함정에서의 영향을 살펴보고 대책을 제시하였다.

## A.2 UWB의 형태 및 특성

UWB 는 식(A.1)처럼 가우스 펄스 형태로 나타내며, 파라미터는 표 A.1 과 같다[13],[14].

$$E(t) = E_0 \exp\left(-\frac{4\pi(t-t_0)^2}{\tau^2}\right) \quad \text{식 (A.1)}$$

구 분	$E_0$ (KV/m)	$t_0$	$\tau$
UWB	1~100kV	$1.22 \times 10^{-9}$	$9.4 \times 10^{-10}$

표 A.1 UWB 파형의 파라미터

HEMP 와 UWB 의 시간 및 주파수 특성 형태를 보면 그림 A.2, 그림 A.3 와 같이 나타낼 수 있으며, HEMP 에 비해 시간 축에서 짧은 펄스 형태이고 주파수 축에서는 광대역의 특성을 나타낸다. 전기장의 세기는 1~100kV 로 함정(Targer)과 발생장치(Source)의 거리에 따라, 전자폭탄의 형태에 따라 다르지만 본 논문에서는 HEMP 전기장의 세기와 비교하기 위하여 50kV/m 를 전자폭탄에 의한 전기장의 세기로 가정하고 진행하였다.

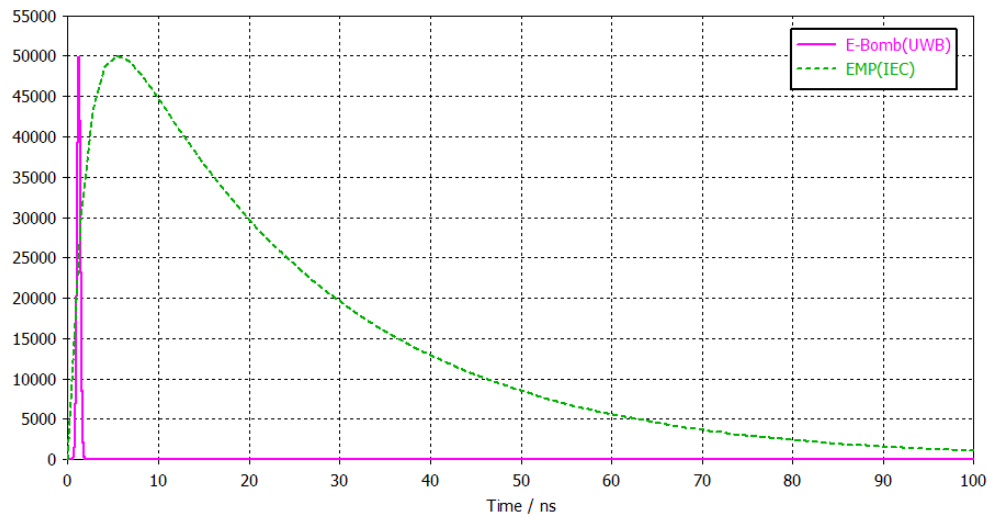


그림 A.2 HEMP와 UWB의 시간 특성

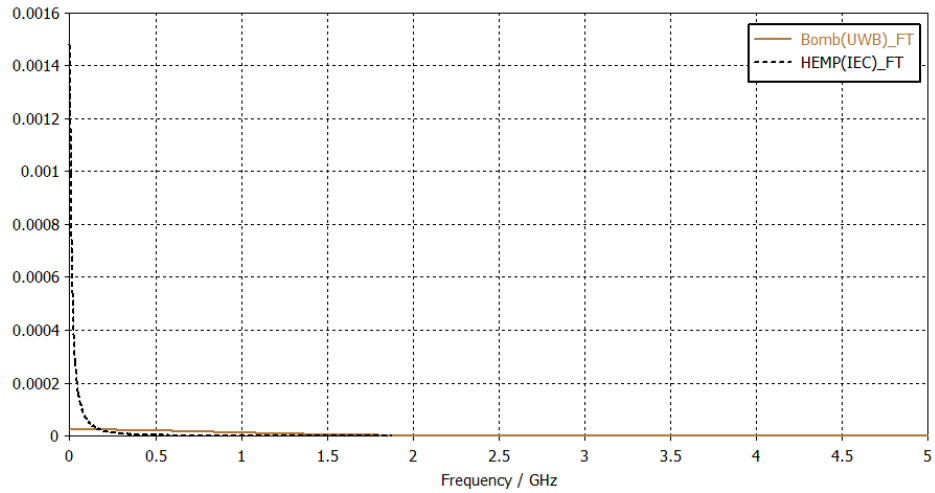


그림 A.3 HEMP와 UWB의 주파수 특성

### A.3 시뮬레이션 결과 및 분석

비핵 전자기펄스 UWB 에 의해 함정의 조타실과 통신실로 침투된 전기장의 세기는 각각 그림 A.4, 그림 A.5 와 같다.

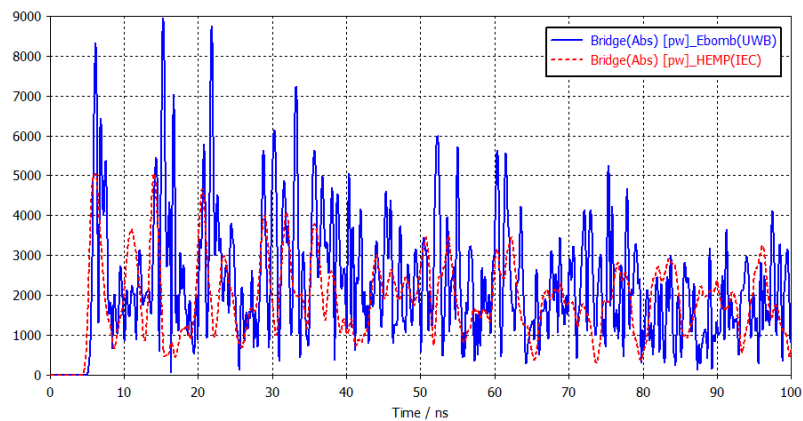


그림 A.4 UWB · HEMP의 함정 침투 전계 비교(조타실)

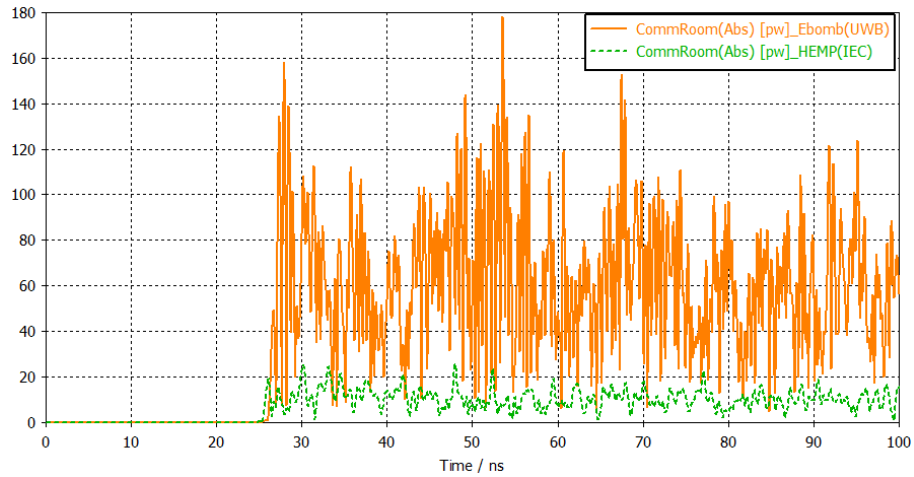


그림 A.5 UWB · HEMP의 함정 침투 전계 비교(통신실)

위 그림 A.4, 그림 A.5 에서 보여주듯이 함정 침투 전계의 크기를 비교해보면 조타실, 통신실 모두 UWB 가 HEMP 에 비하여 상대적으로 큰 전기장의 침투가 있었다. 전기장의 침투에 가장 취약한 창문의 크기에 맞춰서 Cutoff frequency 가 생기는데 창문의 크기로 계산해보면 약 300MHz 이하의 저주파 대역 이하는 잘 침투하지 못하게 된다. 따라서 HEMP 에 비해 상대적으로 고주파 성분이 더 포함된 UWB 의 전자파 에너지가 함정으로 더 침투하게 됨을 알 수 있다. 위 결과를 바탕으로 자유공간에서의 전기장 세기 결과와 함께 차폐효율(Shielding Effectiveness)을 구해보면 아래 그림 A.6 과 같다.

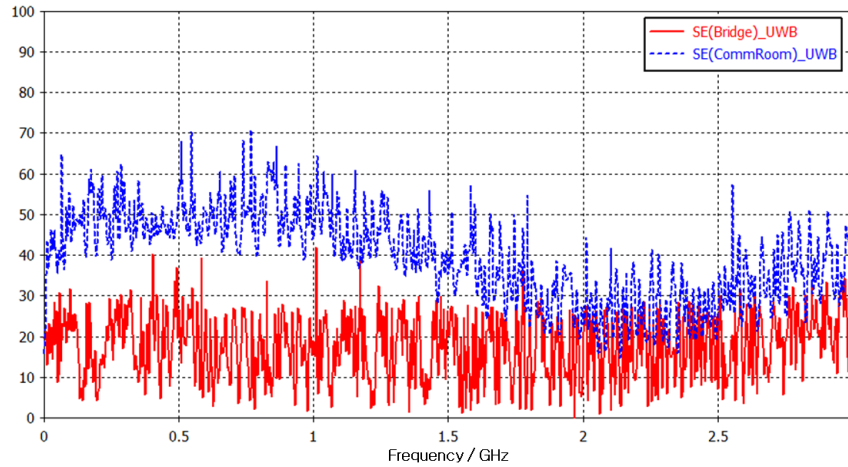


그림 A.6 UWB에 의한 조타실 · 통신실의 차폐효율(Unshielded)

그림 A.6 에서 보듯이 수상함 차폐기준 73dB 에 미치지 못한다.

5 장에서 제시한 방호대책에 의한 방법으로 시뮬레이션상 적용한

결과 아래 그림 A.7 과 같이 73dB 이상 만족함을 확인할 수 있었다.

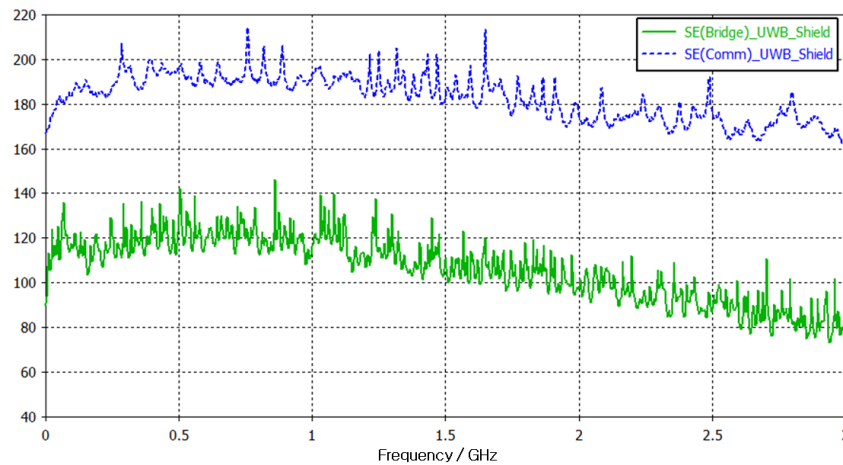


그림 A.7 UWB에 의한 조타실 · 통신실의 차폐효율(Shielded)

## 참고문헌

- [1] 전경웅, “북한 EMP 폭탄, 대응방법은 없는 걸까?”, 2013 년 5 월 22 일자 NewsDaily.
- [2] 안규백, “우리 군 EMP 방호능력 매우 미비”, 2012 년 10 월 5 일자 News1.
- [3] Xia Hui-cheng, Zhang Shi-liao, Mao Jian-zhou, “Analyze on the EMP Weapon Damage to the Ship Electronics System”, Fire Control & Command Control, 2010.35(7).
- [4] Zhen Kelong, Lv Shanwei, Zhang Yan, “Research on Damage of Intense Electromagnetic Pulse to Radar Receiving System”, Global Symposium on Milimeter Waves(GSMM), 2012.
- [5] Military Standard – High-Altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) Protection for ground-based C4I Facilities performing critical, Time-urgent missions, Part 1 Fixed Facilities” MIL-STD-188-125-1(2005. 4. 7), Dept of Defense, Washington, DC.
- [6] 장태현, “HEMP 전도성 방해 펄스 전류 주입(PCI) 케이블의 영향 분석, 한국전자과학회논문지., vol.24, pp. 772-780, 2013 년 8 월.
- [7] 임병진, 정성우, 조병두, 김기채, “HEMP 파원에 의한 무한 도체 평판 개구의 침투 전계 특성”, 한국전자과학회논문지, 2010 년 10 월.
- [8] 이원길, “EMP 방호대책과 소요 기술”, 한국전자과학회지 자유기고문, 2013 년 1 월
- [9] Edoardo Genovese, “Real World Cable Modeling in CST STUDIO SUITE”, CST workshop series 2010, Feb 2010.
- [10] R. J. Barker and E. Schamiloglu, High-Power Microwave Sources and Technologies, IEEE press, New York, 2001.
- [11] M. Abrams, IEEE Spectrum 40, 24-30, Nov, 2003.

- [12] 최진수, 임동우, “전자기펄스 발생과 응용”, 특집 물리학과 국방기술, pp. 36-41, 2006 년 2 월.
- [13] XIAO Jin-shi, LIU Wen-hua, “Simulation of high power EMP effects on a cylinder object with openings using FDTD method, ICMMT 2010 Proceedings
- [14] Daniel Nitsch, “Susceptibility of Some Electronic Equipment to HPEM Threats”, IEEE Transactions on EMC, Vol. 46, NO. 3, August 2004.



# ABSTRACT

## **Electromagnetic Modeling and Protective Measures of High-Altitude Electromagnetic Pulse Coupling into Naval warship**

The High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) generated by a high-altitude nuclear explosion. This paper presents the comparison of electric field penetration in Bell laboratories and IEC 61000-2-9 standard when HEMP source penetrates through conducted coupling path and radiated coupling path. Also we analyze the effects of two kinds of coupling and propose protective measures. Simulation results confirm IEC 61000-2-9 standard is more strict than the Bell Laboratories standard except for a lower frequency band in case of Naval warship, so we propose IEC 61000-2-9 standard as a Naval HEMP standard. Finally, we offer the protective measures such as the shielding coating, Honeycomb ventilation, TVS in order to meet

the military criteria. In addition, the appendix includes characterization of recently emerging concept of non-nuclear electromagnetic pulse and confirms the effect and measures of Naval warship.

| Keywords : EMP, HEMP, Naval Warship, Shielding-  
Effectiveness, PCI test

Student Number : 2012-22569